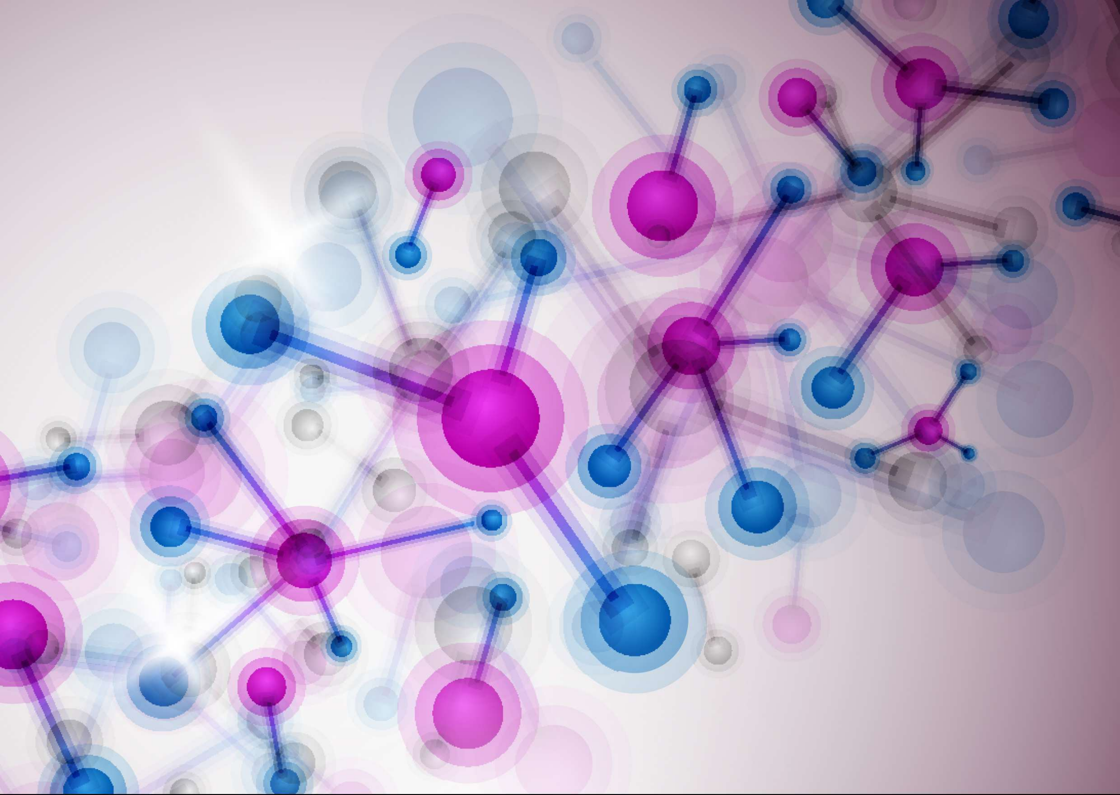


مقدمة قصيرة جدًّا

العدم

فرانك كلوس

العدم

العدم

مقدمة قصيرة جدًّا

تأليف
فرانك كلوس

ترجمة
فايقة جرجس حنا

مراجعة
محمد فتحي خضر

هنداوي

العدم

فرانك كلوس

Nothing

Frank Close

الطبعة الأولى ٢٠١٤م
رقم إيداع ٢٠١٣/٩٢٩٣
جميع الحقوق محفوظة للناشر مؤسسة هنداوي للتعليم والثقافة
المشهرة برقم ٨٨٦٢ بتاريخ ٢٦/٨/٢٠١٢

مؤسسة هنداوي للتعليم والثقافة
إن مؤسسة هنداوي للتعليم والثقافة غير مسئولة عن آراء المؤلف وأفكاره
وإنما يعبِّر الكتاب عن آراء مؤلفه
٥٤ عمارات الفتح، حي السفارات، مدينة نصر ١١٤٧١، القاهرة
جمهورية مصر العربية
تليفون: ٢٢٧٠٦٣٥٢ ٢٠٢ + **فاكس:** ٣٥٣٦٥٨٥٣ ٢٠٢ +
البريد الإلكتروني: hindawi@hindawi.org
الموقع الإلكتروني: http://www.hindawi.org

كلوس، فرانك.
العدم: مقدمة قصيرة جدًّا/تأليف فرانك كلوس.
تدمك: ٥ ٢٩٦ ٧١٩ ٩٧٧ ٩٧٨
١-الوجود والعدم
أ-العنوان
١١١,١

تصميم الغلاف: إيهاب سالم.

المحتويات

إلى ليزي وجون

شكر وتقدير

أعرب عن امتناني لمحررة هذا الكتاب، لاثا مينون، لتشجيعها لي على البحث والكتابة عن موضوع «العدم»، وأقدم الشكر لكل من إيان أتشيسون وبن موريسون وكين بيتش لتعليقاتهم التي ساعدتني على تأليف هذا الكتاب.

الفصل الأول

جعجعة بلا طحن

في مرحلة مبكرة من حياتنا يباغت أغلبنا هذا السؤال: «من أين جاء كل شيء؟» قد نتساءل أيضًا، أين كانت ذاتنا الواعية قبل أن نُولد؟ هل يمكنك أن تحدد ذكرياتك الأولى؟ عندما التحقتُ بالمدرسة لأول مرة، كنت أتذكر بوضوح أحداث العامين أو الثلاثة السابقة، لا سيما العطلات الصيفية التي قضيناها على شاطئ البحر، لكن عندما حاولت أن أسترجع الأحداث المبكرة في حياتي، غامت الرؤى متلاشيةً حتى العدم. قيل لي إن سبب هذا هو أنني وُلدت منذ خمس سنوات فحسب، في عام ١٩٤٥. في نفس الوقت، تحدث والداي عن أحد الحروب، وعن أمور وقعت لهما قبل هذه الحرب، لكن لم يكن لهذا أي مدلول عندي؛ فالعالم الذي عرفته لمَّا يكن موجودًا حينها، وبدا لي أنه بدأ بمولدي، وأنه جاء مُجهزًا بآباء وكبار آخرين. كيف عاشوا «قبل» عالمي الواعي؟

ظل الفراغ الغريب الذي ابتلع كل شيء حتى عام ١٩٤٥ يزعجني، ثم وقع حدث عام ١٩٦٩ منحني منظورًا جديدًا لهذه المشكلة.

كانت أبولو ١٠ تحوم فوق سطح القمر، التي كشفت معجزة الاتصالات عن أنه أرض جرداء مهجورة من الصخور والحصى. كانت صحراء الغبار الرمادي هذه تمتد حتى أفق القمر، الذي أخذ شكلًا منحنيًا قبالة فراغ أسود مرصع بالنجوم المتناثرة؛ تلك الكرات الميتة من الهيدروجين التي تتفجر لينبعث منها الضوء. وسط هذه الصورة القاحلة، إذا بجوهرة زرقاء جميلة ذات سحب بيضاء وقارات خضراء من النباتات، ولأول مرة يشهد البشر ما يعرف بـ «شروق الأرض». ثمة مكان واحد على الأقل في الكون توجد به حياة، في صورة مجموعات هائلة من الذرات نُظمت على نحو يجعلها تملك وعيًا ذاتيًّا وقادرة على التحديق في الكون في تعجب.

ماذا لو لم تكن هناك حياة ذكية؟ بأي منطق كان سيوجد أي من هذا لو لم تكن هناك حياة تدركه؟ منذ عشرة مليارات عام كان من الممكن أن يكون الحال على هذا النحو: فراغ ميت يعج بسحب البلازما وكتل قاحلة من الصخور تدور في الفضاء الفسيح. مع أن حقبة «ما قبل الوعي» هذه خلت من الحياة، ولا بد أنها كانت أشبه بامتداد عظيم لنظرتي الخاصة عن الكون قبل عام مولدي التي تراقصت فيها الجاذبية دون أن يدري بها أحد، فإن الذرات نفسها التي وُجدت حينها هي نفسها التي نتكون منها نحن اليوم. نُظمت مركبات معقدة من هذه الذرات، التي كانت خاملة في السابق، لخلق ما نطلق عليه الوعي وصارت قادرة على أن تستقبل، من أطراف الكون البعيدة، ضوءًا بدأ رحلته في تلك الأوقات المبكرة الخالية من الحياة. وبمقدورنا في «حاضرنا هذا» أن نستدل على تلك الحقبة الميتة المبكرة، وهو ما يضفي عليها نوعًا من الواقعية. إننا لم نُخلق من العدم، وإنما من «مادة أصلية» أولية؛ من ذرات تكونت منذ مليارات السنين جُمعت لفترة زمنية قصيرة في أجساد البشر.

هذا يقود بدوره إلى سؤالي الأخير: ماذا لو لم يكن هناك حياة أو أرض أو كواكب أو شمس أو نجوم أو ذرات تتمتع بالقدرة على إعادة تنظيم نفسها إلى أشياء مستقبلية؛ ماذا لو كان هناك فراغ وحسب؟ بعد أن أزلت كل شيء من صورتي الذهنية عن الكون حاولت تخيل العدم المتبقي. وعندئذ اكتشفت ما أدركه الفلاسفة على مر العصور: من الصعب جدًّا التفكير في الفراغ. حين كنت طفلًا ساذجًا، لطالما تساءلت أين كان الكون قبل مولدي، والآن أحاول تخيل ماذا كان سيوجد ما لم أوُلد على الإطلاق. «إننا محظوظون لأننا سنموت»، ولن يتمتع العدد اللانهائي من الأشكال الممكنة للحمض النووي بالوعي أبدًا، خلا بضعة مليارات منها وحسب. ما الكون بالنسبة لأولئك الذين لن يولدوا أبدًا أو للأموات؟ كل الثقافات وضعت خرافاتها بشأن الموتى؛ إذ إنه من الصعب جدًّا القبول بأن الوعي يمكن أن يندثر بسهولة عندما تتوقف مضخات الأكسجين عن ضخ الأكسجين إلى المخ، لكن ما الذي يعنيه الوعي لتجميعات الحمض النووي التي لم ولن يكتب لها الوجود أبدًا؟

إن فهم كيفية بزوغ الوعي وموته يماثل في الصعوبة فهم كيفية نشأة شيء ما؛ مادة الكون، من العدم. أكان هناك فعل خلق أم أن شيئًا ما كان موجودًا على الدوام؟ أكان من الممكن حتى أن يوجد عدم إذا لم يكن هناك من يدركه؟ كلما حاولت فهم هذه الألغاز، شعرت أنني إما أقترب من الحقيقة أو أنني على حافة الجنون. مرَّت السنون، وبعدما

قضيت حياتي عالمًا يحاول أن يسبر غور الكون، رجعت إلى هذه الأسئلة وقمت برحلة للعثور على الإجابات الموجودة. كانت النتيجة هي هذا الكتاب الصغير. أشعر بالإطراء حين أعرف أنني حين أوجه مثل هذه الأسئلة، فأنا بهذا أنضم إلى صحبة طيبة؛ ذلك لأن هذه الأسئلة طرحها بشكل أو بآخر بعض من أعظم الفلاسفة على مر العصور. علاوة على ذلك، لم يتفق الجميع على إجابة بعينها. من وقت لآخر، حين تسود إحدى الفلسفات على ما سواها، كانت الحكمة المكتسبة تتطور هي الأخرى. أيمكن أن يوجد خواء؛ حالة من العدم؟ يبدو أن إجابات هذه الأسئلة، شأن الأسئلة المتعلقة بوجود إله من عدمه، تعتمد على تعريفك لماهية العدم.

عندما تناول فلاسفة الإغريق القدامى هذه الأسئلة من خلال قوة المنطق، خرجوا علينا بآراء متعارضة. زعم أرسطو أنه لا يمكن أن يوجد مكان فارغ، بل ارتقى هذا الرأي إلى مقام مبدأ مفاده أن «الطبيعة تمقت الخواء». ما الذي يعنيه هذا؟ وما سبب سيادة هذا الظن لألفي عام؟ هذه من أوائل الأسئلة التي سأتناولها. في القرن السابع عشر، ومع بزوغ المنهج التجريبي، أدرك تلاميذ جاليليو أن هذا الاعتقاد يرجع إلى سوء تأويل للظواهر؛ إذ إن مقت الخواء ذلك إنما ينجم عن وجود الغلاف الجوي الذي يزن عشرة أطنان ويضغط على كل متر مربع من كل شيء موجود على الأرض، وهو ما يتسبب في إقحام الهواء في كل ثقب متاح.

كما سنرى لاحقًا، من الممكن إزالة الهواء من الأوعية وصنع فراغ. كان أرسطو مخطئًا. على الأقل هذه هي النتيجة لو لم يكن هناك سوى الهواء؛ فبإزالة الهواء سيُزال كل شيء. ومع تقدم العلم، واتساع مداركنا وحواسنا بواسطة وسائل أكثر تعقيدًا، بات جليًّا أنه ينبغي إزالة ما هو أكثر بكثير من الهواء وحسب للحصول على فراغ حقيقي. يرى العلم الحديث أنه يستحيل من حيث المبدأ صنع فراغ تام، لذا لعل أرسطو لم يكن مخطئًا في نهاية المطاف. ومع ذلك، لا يمانع العلماء المعاصرون في استخدام مفهوم الفراغ، ومن أحد تفاسير الفيزياء الحديثة أنها تصب جمَّ تركيزها على محاولة فهم طبيعة الفراغ، الزماني والمكاني، في أبعادهما المختلفة.

لكن السؤال الذي طرحته على نفسي بمنتهى البراءة هو في الحقيقة أكثر إبهامًا؛ على اعتبار أننا نعرف اليوم ما لم يعرفه أحد حينها: ألا وهو أن الكون يتمدد، وكان يتمدد طيلة أربعة عشر مليار سنة تقريبًا منذ ما سمي بالانفجار العظيم. ونظرًا لأنه لا المجموعة الشمسية ولا الأرض ولا الذرات التي تكوِّن أجسادنا تتمدد، نستنتج من هذا أن «الفضاء

نفسه» هو الذي يتمدد. وعندما نرجئ الآن سؤال «إلى أي مدى سيتمدد»، سنجد تكملة أخرى لسؤالي الأساسي: إذا أزلت كل شيء، فهل سيظل الفضاء يتمدد؟ وهذا بدوره يقودنا إلى سؤال عما يكون الفضاء عليه لو أننا أزلنا كل شيء. هل يوجد الفضاء بمعزل عن الأشياء، بمعنى أنني لو تخلصت فكريًّا من كل تلك الكواكب والنجوم والأجزاء المتنوعة للمادة، هل سيبقى الفضاء حينها أم أن التخلص من المادة سيودي بالفضاء أيضًا؟ لنبدأ إذن رحلتنا البحثية لنتعرف على الأفكار التي يمكن أن نستقيها من مفكرين أكثر حكمة على مر التاريخ ونحاول الإجابة عن أسئلة مثل: هل بمقدورنا تفريغ الفضاء من كل شيء؟ وإن استطعنا ذلك، ماذا سينتج؟ لماذا لم يحدث الانفجار العظيم في وقت مبكر عن ذلك؟ لو جاء الكون نتيجة فعل خلق، فما الذي كان موجودًا قبل هذا الخلق؟ أم أن شيئًا ما كان موجودًا على الدوام ثم تحول ليصير نحن البشر؟

أفكار مبكرة حول العدم

حيرت إشكالية الخلق من العدم، الكينونة واللاكينونة، كل الثقافات المعروفة. فقبل الميلاد بحوالي ١٧٠٠ سنة، ورد في «أنشودة الخلق»
بالريجفدا (أقدم النصوص المقدسة):

في البدء لم يكن هناك وجود ولا عدم.
لم تكن هناك أيضًا مملكة الفضاء ولا السماء من وراءها.
ما الذي كان يتحرك؟ وأين؟

طرح فلاسفة الإغريق هذه الأسئلة للنقاش. رفض طاليس نحو عام ٦٠٠ قبل الميلاد وجود العدم: فمن وجهة نظره لا يمكن أن يظهر شيء من العدم، ولا يمكن أن يختفي شيء إلى عدم. وقد عمم هذا المبدأ ليشمل الكون بأسره: فلا يمكن أن يكون الكون قد بزغ من عدم.

تعارض مفهوم العدم مع قوانين المنطق، وطرح طاليس السؤال: هل التفكير في العدم يجعل منه شيئًا؟ فجاءت الإجابة من وجهة نظر رجال المنطق الإغريق أنه يمكن أن يوجد العدم «فقط» في حال عدم وجود أحدهم لتأمله. ظاهريًّا أُجيب سؤالي، الخاص بإمكانية أن يوجد عدم إذا لم يوجد أي شخص يعرف بوجود العدم، بالإثبات قبل ثلاثة

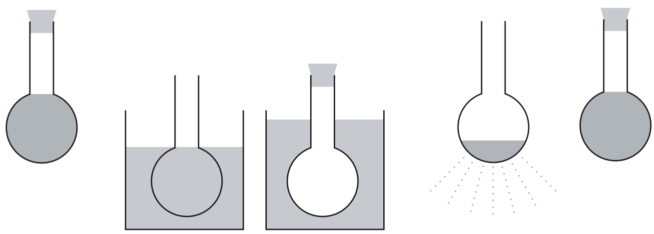
آلاف عام، مع أن الإجابة تبدو لي تأكيدًا بديهيًّا وليست مبنية على الحجج. استمرت رحلتي البحثية لكن تبين أنه لم يقدم أحد بعد طاليس تعريفًا للعدم بخلاف أنه غياب الأشياء.

بعد انتهاء طاليس من قضية العدم، انتقل إلى طبيعة الأشياء. وقد تنبأ بنجاح بكسوف الشمس الذي وقع في الثامن والعشرين من مايو عام ٥٨٥ق.م، الأمر الذي كان يعد إنجازًا هائلًا ويشهد لمقدرته. لا عجب إذن أن لاقت أفكاره مثل هذا التقدير الكبير. أكد طاليس أنه طالما يستحيل ظهور الأشياء من العدم، فمن المؤكد وجود كيان جوهري منتشر انتشارًا واسعًا تجسدت منه كل الأشياء. أثار سؤال «من أين أتى كل شيء؟» سؤالًا آخر: لنفترض أننا أزلنا كل شيء من منطقة ما في الفضاء، هل ما سيتبقى هو العدم الأولي؟ قدم طاليس حلًّا لهذا اللغز أيضًا: فكان ظنه الأساسي هو الماء. إن الجليد والبخار والسائل هي ثلاث صور للماء، ومن ثم ظن طاليس أن الماء يمكنه أن يأخذ عددًا لانهائيًّا من الصور الأخرى، فيتكثف على صورة صخور وكل شيء آخر. فمع الاختفاء الظاهري لبرك المياه، ثم تساقطها فيما بعد على صورة أمطار، بزغت بهذا فكرة التبخر ومعها الاعتراف بالدورة التي يمر بها الماء. ومن وجهة نظر طاليس يكون الفضاء فارغًا عندما تتحول كل مادة فيه إلى شكلها الأولي، وهو الماء السائل مثل المحيط. من ثم، يحتوي الماء كل شكل ممكن للمادة. والآن، بعد ثلاثة آلاف عام، تعد هذه الفكرة غير نافعة، لكن الأفكار الحديثة المتعلقة بالفراغ تقوم على المبدأ ذاته بافتراض أن الفراغ يحتوي على «بحر» عميق لا نهاية له من الجسيمات الأساسية (انظر الفصل السابع).

بعد مرور ثمانٍ وسبعين عامًا من الوعي، عاد طاليس إلى فكرة الفراغ الدائم في عام ٥٤٨ق.م لكن فكرةً وجود جوهر أولي يتغلغل في كل شيء، أو «مادة أصلية»، استمرت. غير أن طبيعة المادة الأصلية خضعت للنقاش. أصر هرقليطس من ناحية على أن المادة الأصلية هي النار. إذن من أين جاءت النار؟ الإجابة هي أن النار أبدية، وهي بهذا مماثلة لفكرة الإله الخالق لهذا العالم. وعلى النقيض، أكد أناكسيمينس أن المادة الأصلية هي الهواء؛ إذ يمكن تصور الهواء على أنه ممتد إلى ما لا نهاية، على خلاف الماء، ويعطيه انتشاره اللامحدود الأولوية في أن يكون المصدر الكوني لكل المواد.

في منتصف القرن الخامس ق.م تعرض أمبيدوكليس لسؤال هل الهواء مادة أم فضاء فارغ؟ شهد الأمر ظهور بدايات طرق التجريب مع استخدام أداة معروفة باسم «هيدرا»؛ وهي قارورة زجاجية مفتوحة عند أحد طرفيها ولها انتفاخ كروي الشكل عند طرفها الآخر. يحتوي الانتفاخ على ثقوب يمكن أن ينسال منها الماء، ما دام الطرف الآخر

مفتوحًا. إذا سددت الفتحة بإصبعك لا يتدفق أي ماء. وإذا أفرغت الهيدرا من الماء ثم غطستها، سيتدفق الماء إليها ويعيد ملأها ما دام الطرف الأعلى مفتوحًا، أما إذا سددت الطرف المفتوح بإصبعك فلا يدخل ماء عبر الثقوب ولا يخرج هواء أيضًا. يبرهن هذا على أن الهواء والماء يوجدان في نفس المساحة؛ فلا يستطيع الماء أن يدخل ما لم يخرج الهواء؛ فالهواء مادة وليس فضاء فارغًا. وظل هذا هو المعتقد السائد إلى أن جاء تورشيلي في القرن السابع عشر وفسر ما يحدث.



شكل ١-١: (أ) قارورة ذات ثقوب في جزئها الكروي السفلي تحتوي على ماء. حين تكون مغلقة من الأعلى، يظل الماء داخلها، لكن إذا فُتحت، (ب)، يتسرب الماء خارجًا من الثقوب. (ج) تُغلق القارورة ثم توضع في حوض من الماء، فلا يدخلها أي ماء. (د) تُفتح القارورة من أعلى فيدخل الماء من الثقوب الموجودة في جزئها السفلي. (هـ) تُغلق القارورة مجددًا ويصير بالإمكان رفع القارورة من الوعاء دون أن يتسرب منها الماء.

توسع أمبيدوكليس في مفهوم المادة الأصلية لتشتمل على أربعة عناصر: الهواء والماء والنار والأرض. وقدم أفكارًا أولية حول القوى: ففي رأيه تنقسم القوة إلى قوى حب وخلاف؛ الصورة الأولية لقوى التجاذب والتنافر. وقطعًا كان هو أول من فرق بين المادة والقوى، لكنه ظل مصرًّا على استحالة وجود الفضاء الخاوي.

كثير من أشكال المادة حبيبية. وعندما تتكدس الأجسام الكروية معًا فإنها تترك مسافات بينها. وبما أنه لا توجد إمكانية لوجود فراغ في الفضاء «الخاوي»، استحدث أمبيدوكليس الأثير؛ الأخف من الهواء، الذي يملأ هذه المسافات، بل كل الفضاء. بل إنه تخيل أن هذا الأثير المنتشر في كل الأرجاء قادر على نقل التأثير من جسم إلى آخر؛ ما يشبه مجال الجاذبية في الفكر الحديث.

رفض أناكساجوراس أيضًا إمكانية وجود الفضاء الخاوي وخلق شيء من العدم. ووفقًا لرأيه فإن الخليقة نظام انبثق عن الفوضى، وليس كونًا ماديًّا ظهر من العدم. إن تحول الفوضى إلى نظام يحمل اعترافًا بتطور الأشياء وتغيرها، كما هو الحال عندما يتحول الطعام إلينا. وقد طرح الافتراض بوجود عناصر أساسية — في الوقت الذي يتغير فيه تركيبها الإجمالي — فكرة البذور وولَّد المذهب الذري. ويرى أناكساجوراس أنه لا وجود لأصغر ذرة، فلا حد لانشطار المادة، ومن ثم لا حاجة إلى القلق بشأن الفراغات بين الأجسام الكروية المتلامسة، ولا حاجة إلى الأثير الذي يملأ الفجوات.

استمر إبيقور (٣٤١–٢٧٠ق.م)، وأيضًا ديموقريطوس وليوكيبوس، على رفضهم لإمكانية أن ينبثق شيء عن العدم. وهم يُعتبرون مبتكري فكرة الذرات؛ التي هي بذور أساسية صغيرة غير مرئية تشيع في المادة. ومن هنا تولدت فكرة إمكانية وجود فراغ؛ مسافة فارغة يمكن أن تتحرك فيها الذرات. كان الاعتقاد هو أنه إذا كان يوجد شيء ما في نقطة ما، فلا يمكن إذن للذرة أن تتحرك إلى هذا المكان؛ فلكي تكون الحركة ممكنة لا بد أن يكون هناك فراغ يمكن أن تتحرك فيه الذرات. بل تخيلوا أيضًا كونًا مُفرَّغًا لانهائيًّا مليئًا بذرات متحركة بالغة الصغر لدرجة تمنعها من أن تُرى بمفردها لكنها تتكدس معًا في تكوينات مرئية. إن الذرات في حالة حركة مستمرة، لكن صورتها الإجمالية ضبابية وتبدو ساكنة. تشبه الصورة بيت النمل: فهو يُرى من بعيد ككومة ساكنة، لكن عند الاقتراب منه يتضح أنه يتكون من ملايين النمل دقيق الحجم الذي يتحرك حركة مستعرة.

على الرغم من أن أفكار أتباع المذهب الذري أكثر شبهًا للصورة التي نملكها اليوم عن المادة، فإن أفكار أرسطو المخالفة هي التي سادت طيلة ألفي عام. رأى أرسطو أن الفراغ لا بد أن يكون منتظمًا ومتناظرًا تمامًا؛ بحيث يستحيل تمييزه من الأمام أو الخلف، أو اليمين أو اليسار، أو من أعلاه أو أسفله. ظهر هذا المبدأ أيضًا في «أنشودة الخلق» بالريجفدا التي تغنت قائلة:

أكان هناك أسفل؟
أكان هناك أعلى؟

من منظور هذه الفلسفة لا يمكن للشيء أن يسقط أو يتحرك، وإنما يوجد في حالة ساكنة فحسب، وهي الفكرة التي ستشكل في نهاية المطاف أساس ميكانيكا نيوتن. غير

أن أرسطو رأى أن مثل هذه الخصائص تنكر وجود العدم، وصاغ الحجج المنطقية التي تنكر وجود العدم في أوضح صورها. إذا كان الفضاء الفارغ شيئًا، وإذا وضعنا جسمًا ما في هذا الفضاء الفارغ، عندئذ سيصبح لدينا شيئان في نفس المكان والزمان. إذا كان هذا ممكنًا، فسيُعمم الأمر بحيث يسمح لأي شيء بأن يوجد في نفس مكان وجود أي شيء آخر، وهذا هراء. لذا من وجهة نظر أرسطو بدا أن المنطق يقضي بعدم اعتبار الفضاء الخاوي شيئًا، ومن ثم فهو غير موجود. وقد عرَّف الفراغ بأنه غياب أي جسم، ولمَّا كانت العناصر الأساسية للأشياء موجودة بلا انتهاء، فلا يمكن إذن أن يوجد مكان فارغ تمامًا.

باختصار رفض منطق أرسطو وجود الفراغ وقاد إلى الحكمة الشائعة القائلة إن الطبيعة تمقت الخواء. واعتُبرت هذه الحقيقة بديهية، غير أنها كانت خاطئة كما سنرى الآن.

لم هذا المقت؟

ظل القول إن الطبيعة تمقت الفراغ مقبولًا طيلة ألفي عام، حتى انقضاء السواد الأعظم من العصور الوسطى؛ لأن هذا القول كان التفسير الأبسط، والبديهي في ظاهره، لنطاق كامل من الظواهر اليومية. حاول أن تشفط الهواء من ماصة، سيأتيك الهواء مندفعًا من الطرف الآخر، وسيشبه الأمر محاولة شفط الهواء من الغرفة بأكملها. سد أحد طرفي الماصة بأصبعك واشفط الهواء من الطرف الآخر: لن يحدث تفريغ بل ستنثني الماصة على نفسها. أو ضع طرف الماصة في كوب عصير واشفط، ما سيحدث هو أنك ستشرب العصير. إنك لن تخلق فراغًا عن طريق شفط الهواء، بل يبدو أن السائل يرتفع ضد الجاذبية كي يملأ الفجوة. من السهل، بل ربما من «الطبيعي» أن نظن أن الفراغ الذي في سبيله للتكون يسحب السائل إلى أعلى ومن ثم يستحيل تكوُّن الفراغ. هكذا يظن كثير من الأطفال، لكن الإجابة الصحيحة عكس ما يبدو تمامًا. تطلب إماطة اللثام عن التفسير الحقيقي جهود جاليليو وبعضًا من أمهر عقول القرن السابع عشر.

ثمة أمثلة أخرى تؤدي ظاهريًّا إلى النتيجة نفسها. ضع طبقين مسطحين مبللين أحدهما فوق الآخر. سيكون من السهولة بمكان أن تدفع أحدهما بحيث ينزلق بعيدًا عن الآخر، لكن إذا حاولت جذب الطبق العلوي فسيكون ذلك غاية في الصعوبة. التفسير الساذج لهذا هو أنك تخلق بهذا الصنيع فراغًا بين الطبقين، ولمَّا كانت «الطبيعة تمقت الفراغ»، سيكون من الصعب جدًّا أن تفصلهما.

وبالعودة إلى الماصة: بعد أن تشفط لثانية أو ثانيتين، ضع إصبعك عند الطرف العلوي للماصة واترك الطرف الآخر في العصير، فتجد عمودًا من السائل داخل الماصة. ارفع إصبعك فتجد العصير ينزل مرة أخرى إلى الكوب: لماذا إذن لم يحدث هذا عندما يغطي إصبعك طرف الماصة العلوي؟ الإجابة مرة أخرى هي «مقت الفراغ». لماذا لم ينقسم عمود السائل إلى نصفين بحيث يسقط النصف السفلي إلى أسفل ويظل النصف العلوي في الماصة؟ عُلل ذلك بأن هذا يتطلب تكوُّن فراغ عند الفارق بين القسمين، على الأقل إلى أن ينزل الجزء السفلي من عمود السائل من الماصة. وعلى ما يبدو فإن بقاء عمود السائل كان دليلًا آخر على مقت الطبيعة لتكوين الفراغ.

سادت هذه التعليلات طيلة ألفي عام، وهي خاطئة. وما زاد من صعوبة اكتشاف التعليل الصحيح هو أن الكثيرين اعتبروا مقت الفراغ أمرًا بديهيًّا؛ نظرًا لأن الله ما كان ليخلق عدمًا. وإذا أصررت على العكس بأن وجود الفراغ ممكن، عندئذ عليك أن تنتقي كلماتك بحذر كي تتحاشى الاتهام بالهرطقة. ثمة حجة بديلة سارت على الشكل الآتي: الله كلي القدرة، من ثم يمكنه أن يخلق أي شيء أو لا شيء؛ أن تقول إن الله ما كان ليخلق العدم فإنك تحد من قدرات الله، ومن ثم يمكن أن يوجد الفراغ. اعتقد جاليليو، الذي جابه مثل هذه المشكلات فيما بعد، أن الفراغ ممكن، وكان أول من اقترح اختبار الفكرة عن طريق إجراء التجارب. إن فكرة اختبار الأفكار المجردة بالطريقة التجريبية كانت فكرة ثورية، وخطيرة أيضًا: فغالبًا ما كان ينتهي الحال بالهراطقة بالإعدام على خازوق. ونتيجة لهذه التجارب، باتت أسباب المقت الظاهري واضحة وباتت خصائص الفراغ مفهومة. في تلك الأثناء، ومع اتساع الفهم، اخْتُرع العديد من الأدوات التي نألفها اليوم.

الهواء

حين كنا أطفالًا كنا نعي النظام الطبيعي للأشياء هكذا: الأشياء المتحركة تبطئ في حركتها والأشياء الأخف كالورق تسقط إلى الأرض أبطأ من الأحجار. أرست تجارب جاليليو — التي قادت إلى قانون نيوتن القائل إن الأجسام تستمر في حالة حركة منتظمة وفي خط مستقيم ما لم تعترضها قوة خارجية — كنه الطبيعة الحقيقي.

كان جاليليو أول من أثبت أن الهواء له وزن. لقد استغل حقيقة أن الهواء الساخن يرتفع ومن ثم يخرج من الوعاء المفتوح عند تسخينه. وبوزن الوعاء قبل وبعد التسخين، اكتشف أن الهواء المتصاعد يأخذ معه بعض الوزن. أثبت هذا أن الهواء له وزن، غير أنه

لم يستطع أن يحدد كثافته نظرًا لأنه لم يعرف الحجم المتصاعد بالتحديد. وبوزن بالون مملوء بالهواء أولًا، ثم بالماء ثانية، استخلص أن وزن الهواء أخف ٤٠٠ مرة من وزن الماء، وهو الأمر المثير للدهشة في ظل أن التجربة غاية في البدائية: إذ إن القيمة الدقيقة المعروفة اليوم هي معامل يصل إلى نحو ٨٠٠ عند مستوى سطح البحر.

وكأي شخص سار وسط رياح الهواء العاتية، كان مدركًا أيضًا أن الهواء له قوة، وكان هذا قبل أن يربط إسحاق نيوتن القوة والوزن والعجلة على نحو وافٍ بعقود. يقاوم الهواء الحركة كما الحال عندما تعصف الريح بريشة خفيفة الوزن، وحتى لو كان الهواء ساكنًا، فإن الريشة لا تستقر على الأرض إلا ببطء في حين تسقط الصخرة سريعًا. يسقط الحجر وكتلة الرصاص اللذان لهما نفس الحجم لكن لهما وزنان مختلفان بنفس المعدل، وأدرك جاليليو بالبداهة أن هذا هو الوضع الطبيعي؛ فمقاومة الهواء هي التي تؤثر في الريشة.

قد تكون تأثيرات الهواء مدهشة. إن مقاومة الهواء للحركة هي التي تدفعنا إلى أن نثبت قدمنا على دواسة البنزين كي نبقي على السيارة متحركة بسرعة ثابتة. ودواسة البنزين هي وسيلة التزويد بالقوة التي من شأنها أن تدفع السيارة إلى الأمام، ولو لم تكن هناك مقاومة للهواء، فستزيد هذه القوة من سرعة السيارة على نحو هائل. لكن كلما تحركنا أسرع، زادت القوة المقاومة. وعندما توازن قوة التسارع قوة الهواء المقاومة بالضبط، عندئذ فقط تتحرك السيارة بسرعة ثابتة.

يندفع الهواء المُزاح حول السيارة تاركًا طبقات الهواء «الأخف» خلفها مباشرة. والفارق بين الضغط المرتفع بالأمام والضغط المنخفض بالخلف يساوي قوة المقاومة الصافية. إذا كان شكل السيارة مصممًا بحيث يتجمع الهواء سريعًا خلفها مباشرة، عندئذ يقل فارق الضغط هذا وتقل معه أيضًا مقاومة الهواء. إن تصميم السيارات، أو الخوذات التي يرتديها متسابقو الدراجات البخارية أو متزلجو المنحدرات، على نحو يقلل من مقاومة الهواء يعد صناعة هائلة.

لم تكن مثل هذه الأمثلة الواضحة متوافرة في القرن السابع عشر، مما يسلط الضوء على عبقرية جاليليو في تحليل المشكلة إلى أساسياتها. إن الحصوة التي تسقط في سائل لزج، تكاد تتوقف في الحال، وتقل المقاومة في الماء وتقل أكثر في الهواء. استخلص جاليليو من هذا أنه لو لم تكن هناك أدنى مقاومة للهواء، لسقطت كل الأجسام بنفس المعدل. ومع أن جاليليو لم يستطع أن يصنع فراغًا، فمن الواضح أنه لم يكن لديه أدنى مشكلات

فلسفية متعلقة بإمكانية وجود هذه الحالة من حيث المبدأ؛ كل ما هنالك أنه يصعب جدًّا صنعها. وقد أُثبت هذا أمام الجميع بعدها بثلاثمائة عام عندما أسقط رواد فضاء أبولو ريشةً وحجرًا على سطح القمر، ويبدو أن أول إثبات تجريبي لهذا المبدأ قام به جيه ديزاجيلير في الرابع والعشرين من أكتوبر عام ١٧١٧ في الجمعية الملكية بلندن أمام إسحاق نيوتن.

صنع فراغ

أدرك جاليليو أن مضخات السحب لا يمكنها أن ترفع المياه أكثر من عشرة أمتار تقريبًا. تقاوم الطبيعة تكوين الفراغ، لكن إلى حد معين على ما يبدو؛ فبعد عشرة أمتار من المياه، يفشل الشيء الذي يمنع تكوين الفراغ، أيًّا كانت ماهيته، في دوره. وتساءل جاليليو ما الذي سيحدث لو استخدمنا الزئبق، الذي هو أكثر السوائل كثافةً، بدلًا من المياه؟ توصل إيفانجيلستا تورشيللي، أحد تلاميذ جاليليو، إلى الإجابة عام ١٦٤٣ بناءً على نصيحة جاليليو. وقد برهن هذا عن طريق إجراء تجربة بسيطة باستخدام أنبوب زجاجي مجوف طوله حوالي متر، مسدودًا عند إحدى طرفيه، ووعاء مملوءًا بالزئبق.

قد تصور الكتب المدرسية الحديثة التجربة على النحو الآتي: استخدم أولًا أنبوبًا قصيرًا، طوله عشرة أو عشرون سم، واملأه بالزئبق. سد بإصبعك الطرف المفتوح ونكس الأنبوب. اخفض الأنبوب بحذر إلى وعاء من الزئبق ولا ترفع إصبعك إلى أن يكون طرف الأنبوب المفتوح تحت سطح الزئبق بالوعاء. عندما يصبح طرف الأنبوب المفتوح مغمورًا يظل السائل الموجود داخل الأنبوب في مكانه: فينتصب عمود من الزئبق فوق سطح السائل. أجرى تورشيللي التجربة باستخدام الزئبق، مع أن خصائصه السامة تجعله أقل شيوعًا في إجراء التجارب اليوم. وقد أدرك أن قدرة السائل على التماسك ارتبطت بالأوزان النسبية للزئبق داخل الأنبوب وللجو الذي يعلوه مباشرة. وعلى نحو أكثر دقة، لمعادلة الضغط الذي يبذله الضغط الجوي على الزئبق الذي في الوعاء، لا بد أن يصل ارتفاع الزئبق داخل الأنبوب إلى مستوى معين.

اتضح في تجربة تورشيللي أن هذا الارتفاع يبلغ حوالي ٧٦سم، وهنا يكمن اللغز: إذا نُكس أنبوب طوله متر مليء بالزئبق ثم وُضع في وعاء من الزئبق، فإن الزئبق الذي في الأنبوب يهبط إلى أن يصير طول العمود ٧٦ سنتيمترًا فحسب ثم يسكن. ماذا يوجد في الأربعة والعشرين سنتيمترًا التي تعلو الزئبق في الجزء العلوي من الأنبوب؟ يبدو أن الجزء

الذي كان يوجد فيه الزئبق في وقت ما أصبح فارغًا الآن؛ إذ يعجز الهواء عن الدخول، وعليه أدرك تورشيللي أنه صنع فراغًا.



شكل ١-٢: أنصاف كرات ماجديبورج.[1]

عند مستوى سطح البحر يضغط علينا الجو بقوة تبلغ نحو كيلوجرام في كل سنتيمتر مربع، أي بما يعادل ١٠ أطنان لكل متر مربع. ثمة تجربة شهيرة تثبت كم يمكن أن يكون الهواء قويًّا أجراها أوتو فون جوريك، عمدة ماجديبورج لثلاثين عامًا والعالم صاحب الموهبة الواضحة في تبسيط العلوم.

في عام ١٦٥٤ أجرى عالِمُنا «استعراض الفراغ» الذي تضمن ستة عشر حصانًا، ونصفي كرة برونزيين مجوفين نصف قطر كل منهما حوالي متر، مع الاستعانة بخدمة الإطفاء المحلية. وُضع نصفا الكرة معًا لعمل كرة مجوفة. وأوضح فون جوريك أولًا أنه يسهل وضع نصفي الكرة معًا مثلما يسهل فصلهما. وبمهارة استعراضية يحسده عليها السحرة دعا أفرادًا من جمهور المشاهدين للتأكد من أنه يسهل فصلهما. ثم بدأ العرض

الحقيقي. وُصِّلت مضخة تفريغ، تكرم بتقديمها قسم الإطفاء، بصمام في أحد نصفي الكرة، وسُحب الهواء الذي بالداخل. وبعد بضع دقائق أعلن العمدة أنه جرت إزالة الهواء، ثم أُغلق الصمام، وأُزيلت المضخة، ودعا الجمهور إلى فصل نصفي الكرة. لكن الأمر كان مستحيلًا. ولجعل المسألة أكثر إثارة — ولهذا السبب ظلت هذه المناسبة عالقة في الأذهان — أحضر فريقين كل منهما مكون من ثمانية أحصنة مربوطين معًا، ورُبط كل فريق بأحد نصفي الكرة. اكتفت الكتب الدراسية عند هذه النقطة بالإشارة إلى أن الفريقين تجاذبا في اتجاهين معاكسين وظل نصفا الكرة متلاصقين كما هما. لكن الحقيقة كانت أكثر عشوائية؛ فكل حصان على حدة كانت لديه فكرته الخاصة فيما شاء أن يفعل فكانت الأحصنة تجذب في مختلف الاتجاهات. استغرق الأمر ستة محاولات قبل أن يستطيع فون جوريك أن يجعل أحصنة كل فريق تشد معًا في نفس الاتجاه. أخيرًا بدأت لعبة شد الحبل الصحيحة، وشدَّ الفريقان في الاتجاهين المعاكسين بكل قوتهم، وظل نصفا الكرة يرفضان الانفصال. عندئذ فتح الصمام وسُمح للهواء بدخول الكرة فانفصل نصفا الكرة بسهولة!

في تجربة فون جوريك، عندما أُزيل الهواء من داخل الكرة، ضغط الوزن الكامل للجو على الجانب الخارجي من الكرة بقوة تعادل عشرة أطنان للمتر المربع، دون أن يوجد ضغط معادل داخل الكرة ليصد هذه القوة. كان النحاس قويًّا بالدرجة الكافية لتجنب الانسحاق، لكن ولا حتى فريق مكون من ثمانية أحصنة كان قويًّا بما يكفي لتوفير أطنان القوة اللازمة للتغلب على الضغط الخارجي.

بليز باسكال: الماء والنبيذ

في فرنسا كان العالم بليز باسكال يتمتع هو الآخر بالموهبة الاستعراضية. وقد كرر تجربة تورشيلي لكن باستخدام الماء والنبيذ هذه المرة بدلًا من الزئبق.

أجرى باسكال تجربته في مدينة روان أمام جمهور مؤلف من عدة مئات، واستخدم أنابيب يصل طولها إلى خمسة عشر مترًا، يمكن رفعها عموديًّا بواسطة سواري سفن يمكن إمالتها. كان سبب هذا الطول الكبير هو أن كثافة الماء والنبيذ أقل خمس عشرة مرة من كثافة الزئبق، ومن ثم يدعم الضغط الجوي عمودًا أعلى بمقدار خمس عشرة مرة؛ أي بارتفاع أحد عشر مترًا في المجمل. كانت التجربة هائلة، مما جذب المزيد من المشاهدين، وكان هناك تحدٍّ: أيهما سيكون أطول؛ عمود الماء أم عمود النبيذ؟

يمكنك أن تقرر بنفسك، وإليك شيئين لا بد أن تعرفهما عن خصائصهما، أولًا: النبيذ أقل كثافة — أخف لكل لتر — من الماء، لكنه أيضًا أكثر تطايرًا (إن كنت تستطيع تمييز رائحة النبيذ جيدًا، فهذا يرجع إلى أن بمقدورك استنشاق بخاره)، في حين أن الماء (ما لم يكن مضافًا إليه الكثير من الكلور) أقل تطايرًا. وما دام الموضوع متعلقًا بالثقل، كان المرء سيتوقع أن عمود الماء الأكثر كثافة سينتهي به الحال على ارتفاع أقل من عمود النبيذ، كما الحال بالضبط مع عمود الزئبق الذي يكون ارتفاعه أقل من الاثنين. لكن ماذا يحدث في المسافة الفارغة التي تعلو عمود السائل، والمحتجزة في الجزء العلوي من الأنبوب؟

لاحظ أنه في تلك الفترة لم يعتقد أحد في وجود الفراغ؛ إذ كان مبدأ العدم يعد ضربًا من ضروب المستحيلات. أحد «تفاسير» ما كان يحدث هو أن البخار المتصاعد من السائل ملأ المساحة الموجودة في الطرف العلوي من الأنبوب، وأنه بطريقة ما كلما كان السائل أكثر تطايرًا، زادت المساحة الفارغة. وطبقًا لهذه النظرية ينتج عن النبيذ الأكثر تطايرًا مساحة أكبر وبالتالي عمود أقل ارتفاعًا من عمود الماء. ومع ذلك، إن كان الضغط الجوي الذي يضغط على السطح المحيط بالعمود هو ما يدعمه، لكان عمود النبيذ الأخف أعلى من عمود الماء لنفس السبب الذي جعل ارتفاع كليهما أقل من ارتفاع عمود الزئبق.

ملأ باسكال الأنبوبين، ورفعهما فكانا أعلى من أسطح المنازل، واكتشف أن عمود النبيذ أطول من عمود الماء. ومن ثم أوضح باسكال أن التطاير ليس السبب في حدوث الفراغ، وإنما الضغط الجوي هو ما يحدد الارتفاع. وأن المساحة التي تعلو السائل خاوية، أي فراغ.

بعد أن أثبتنا لتونا وجود الفراغ، من الإنصاف الإقرار بأن فكرة أن البخار له دور لا يجب رفضها كليةً. فثمة بخار تصاعد من النبيذ وتسلل إلى الفراغ أعلاه. و«ضغط هذا البخار» يضغط العمود لأسفل قليلًا؛ «قليلًا» لأنه ضعيف للغاية مقارنة بالضغط الجوي الواقع على قاعدته. كان من شأن القياس الدقيق لمعدل ارتفاع الماء والنبيذ مقارنة بمعدل وزن كل منهما أن يظهر وجود دفعة خفيفة إلى الأسفل تسبب بها بخار النبيذ. ومن ثم، فالمسافة التي تعلو عمود النبيذ ليست فارغة تمامًا، مع أنها تكاد تكون فارغة تمامًا مقارنة بالجو.

بم يمكن تشبيه الفراغ؟

صنع تورشيلي فراغًا، أو على الأقل مسافة خالية من الهواء تبدو في ظاهرها فراغًا. لكن ماذا كان هذا: ما خصائص العدم؟

في إنجلترا صنع روبرت هوك مضخات التفريغ التي استخدمها روبرت بويل لتفريغ مساحات أكبر كثيرًا من تلك التي استطاع تورشيللي أن يفرغها، مما مكنه من أن يستكشف خصائص الفراغ. وقد أثبت أن الهواء قد اختفى بالفعل من خلال مشاهدة طيور وفئران تختنق: كانت الفلسفة الأخلاقية مختلفة وقتذاك. وظل بالإمكان رؤية مصباح متوهج عند النظر إليه عبر الفراغ، مما أثبت أنه يمكن للضوء أن ينتقل خلال المساحات الفارغة، غير أن صوت الجرس تلاشى مع إزالة الهواء.

وفي فرنسا تمكن بليز باسكال من وزن الفراغ؛ إذ صمم أنبوبًا موصِّلًا بأحد طرفيه مِحقنًا استخدمه في سحب الزئبق من وعاء. ارتفع العمود إلى أن بلغ ارتفاعه ٧٦سم، وعندئذ توقف. حتى هذه اللحظة تشبه تجربته تجربة تورشيللي. لكن باسكال استمر في سحب مكبس المحقن، فظل ارتفاع عمود الزئبق كما هو لكن إجمالي طول أنبوب المحقن زاد؛ أي إن مقدار المساحة الفارغة فوق الزئبق تزيد. أثناء إجراء التجربة، كان باسكال يضع الجهاز بأكمله على ميزان. وطيلة إجراءات التجربة بأكملها ظل الوزن ثابتًا. في أثناء دخول الزئبق إلى الأنبوب كان هذا منطقيًّا لأن كمية الزئبق ظلت ثابتة؛ كل ما هنالك أنها انتقلت من الوعاء إلى الأنبوب. لكن حالما وصل ارتفاع عمود الزئبق إلى ٧٦ سنتيمترًا وتوقف، زادت مساحة الفراغ فوق العمود. وكانت هذه المساحة مليئة بـ «الفراغ». هكذا أوضح باسكال أن الفراغ ليس له وزن يُذكر. (فعليًّا، لم يكن ميزانه حساسًا بما يكفي. ففي الواقع، ينخفض الوزن مع استطالة المحقن وحلول الفراغ محل الهواء الذي كان بداخله في الأساس. من ثم ينخفض الوزن الحقيقي. لكن وفق أهداف باسكال كانت النتيجة مثيرة: فأيًّا كان ما يشغل مساحة تورشيللي المُفرَغة، فليس له وزن يُذكر).

ضغط الهواء

نطلق على الوزن الواقع على وحدة المساحة لسطح ما «الضغط». يمكن للمرء أن يطفو على الجليد باستخدام الزلاجات في حين أنه قد يغوص فيه إذا ارتدى حذاءه العادي؛ يُعزى ذلك إلى أن وزنه يُوزَّع فوق مساحة أعرض في حالة الزلاجات وبالتالي يقل الضغط؛ أي الوزن لكل وحدة من المساحة. وضغط الجو عند مستوى سطح البحر هو نفسه الضغط الذي يبذله عمود الزئبق البالغ ارتفاعه ٧٦ سنتيمترًا أو عمود الماء البالغ ارتفاعه ١١ مترًا.

إذا وُضع عمود من الزئبق ارتفاعه ٧٦ سنتيمترًا باتزان على رأسك، فإن إجمالي الضغط الذي تشعر به هو ضغطان جويان؛ أحدهما من الهواء والآخر من الزئبق المساوي

له في القيمة. وبشكل أكثر عملية تدبر ما يحدث عند الغوص في البحر: إذ إن الماء المالح يزيد قليلًا في كثافته عن ماء الصنبور، فإن ١٠ أمتار منه كافية لمضاعفة الضغط الجوي. وعليه، كلما غصت فيه عشرة أمتار إضافية، أُضيف ضغط آخر معادل للضغط الجوي. كل التأثيرات المنسوبة للحكمة المقدسة القائلة إن «الطبيعة تمقت الفراغ» ترجع إلى ضغط الهواء الخارجي.

بما أن مساحة سطح جسم الإنسان تبلغ حوالي متر مربع، فهذا يعني أنه تضغط على جسم الإنسان عشرة أطنان من القوة عند مستوى سطح البحر، وطن آخر مع كل متر يغوصه في البحر. لماذا إذن لا تشعر بهذا؟ الضغط يحدث نتيجة تراكم جزيئات الهواء بعضها على بعض. وفي حالة التوازن، تضغط الجزيئات إلى الأجناب وإلى أعلى وأسفل بنفس المقدار، وإلا سيكون هناك قوة صافية وعجلة. ينطبق هذا أيضًا على الضغط في السوائل كالماء. يضغط الهواء الموجود داخل رئتينا نحو الخارج مثلما يضغط علينا الجو من الخارج. تنشأ حالة الارتياح (عدم شعورنا بالضغط) نتيجة للتوازن بين الضغط الخارجي والضغط المضاد الداخلي. والتغير المفاجئ في الضغط، كما الحال عند هبوط المصعد بسرعة أو إقلاع الطائرة أو الغوص المفاجئ أثناء السباحة، يمكن أن يسبب الإزعاج. والأذن «تتألم» من اختلاف الضغط الشديد.

يسبب التغير المفاجئ في الارتفاع حدوث تغير في الضغط. يُعزى هذا إلى أن الغلاف الجوي محدود؛ فالضغط يقل على الارتفاع العالي لأن الثقل الواقع على المرء يقل مع اقترابه من «سطح» الغلاف الجوي. وفي حين أن سطح البحر يكون محددًا بدقة، فإن سطح الغلاف الجوي يكون متدرجًا وتقل كثافته إلى أن نصل في آخر المطاف إلى فراغ الفضاء الخارجي. كان هذا هو التصور الأول للغلاف الجوي.

أجرى بليز باسكال تجربة إبداعية في عام ١٦٤٨ أثبت بها أن مستوى السائل في البارومتر يعتمد على الارتفاع، ومن هنا استنتج أن ضغط الهواء يلعب دورًا مهمًّا. قاس صهره فلورين برير ارتفاع عمود الزئبق على قمة هضبة «بوي دي دوم»، على ارتفاع ٨٥٠ مترًا فوق سطح البحر، وفي نفس الوقت أُجري قياس مشابه عند السفح. كان ارتفاع عمود الزئبق عند القمة أقل بثمانية سنتيمترات من الارتفاع الطبيعي البالغ ٧٦ سنتيمترًا عند السفح. أثبت هذا أن عمود الزئبق ينخفض كلما زاد الارتفاع؛ بسبب انخفاض الضغط الجوي كلما ارتفعنا لأعلى، وهذا يرجع بدوره إلى أنه كلما ارتفعنا قل ثقل الهواء الذي يضغط علينا.

هكذا اختُرِع مقياس الارتفاع «الألتيمتر»؛ يستخدم لقياس ارتفاع الفرد من خلال قياس الضغط النسبي لمحيط الهواء فوقه. إلا أن التأثير الأعمق لهذا الاكتشاف كان متعلقًا بطبيعة الغلاف الجوي نفسه؛ إذ أوحى بأن الأرض تغلفها طبقة محدودة من الهواء، فمحيط الهواء له سطح يكمن خلفه الفراغ كما يُظن. (كان أرسطو أيضًا يعتقد أن الهواء يشبه المحيط الذي له سطح، لكن ما وراءه هو نار). كانت هذه فكرة هرطقية من وجهة نظر بعض الفلاسفة الدينيين الذين لم يستطيعوا قبول فكرة أن الله يمكن أن يخلق خلقًا عديم النفع كالفراغ. غير أن المنهج التجريبي قام بدور في كشف نقائص مثل هذه الخرافات، كما سيفعل عبر القرون التالية في العديد من الحالات الأخرى.

يمكننا اليوم أن نختبر تأثيرات الضغط الجوي بطرق شتى. ينخفض الضغط الجوي مع الارتفاع؛ إذ يقل الضغط ثلاث مرات على قمة جبل إفرست عنه على مستوى سطح البحر؛ إذ لن يرتفع عمود الزئبق إلا بمقدار ٢٥ سنتيمترًا فحسب. هكذا يكون الحال على ارتفاع ١٠ كيلومترات فوقنا. تحلق الطائرات على مثل هذا الارتفاع، ولا بد من تعديل الضغط داخل الكبائن ليتطابق مع مستوى مشابه للضغط الطبيعي عند ارتفاع ميل تقريبًا. يعني هذا أن القوة الواقعة على كل متر مربع من الهواء المعدل ضغطه داخل الطائرة أكبر بكثير من القوة في الهواء الأخف خارج الطائرة. ونتيجة لذلك ثمة قوة قدرها أطنان عديدة تضغط أبواب الطائرة إلى الخارج. في المرة القادمة التي تكون فيها على متن طائرة، لاحظ كيف صُممت الأبواب ببراعة بحيث لا يمكن أن تفتح نحو الخارج مباشرة؛ لا بد من أن تُشَد إلى الداخل أولًا ثم تُدار لتفتح. في واقع الأمر يساعد الضغط المتجه نحو الخارج على إبقاء الأبواب في موضعها بثبات أثناء التحليق.

وعلى ارتفاع ١٠٠ كيلومتر يكون الضغط أقل من واحد على ألف مليون من الضغط على سطح الأرض، وعلى ارتفاع ٤٠٠ كيلومتر يكون واحد على مليون مليون، وفي الطريق إلى القمر في الفضاء يقل الضغط ليصل إلى $١٠^{١٩}$، أي أقل من حجم البروتون مقارنة بالكيلومتر. عندئذ يمكن القول إن الغلاف الجوي بأسره يكمن في الأساس في قشرة رفيعة لا يتجاوز سمكها واحدًا على الألف من نصف قطر الأرض. لو كان هذا الأمر معروفًا جيدًا، لاهتم بعض الساسة بالضرر الواقع على ذلك الغاز الإعجازي الذي تعتمد عليه حياتنا. عندما نقترب أكثر من قمة الغلاف الجوي، يقل الثقل الواقع علينا وينخفض الضغط. وعندما ينطلق رواد الفضاء إلى القمر، فإنهم يجتازون في أول عشرة كيلومترات كمية من المادة تفوق تلك التي يجتازونها خلال بقية الرحلة. ولو سافروا إلى أبعد النجوم فسيظل الوضع كذلك أيضًا.

حتى على سطح الأرض يتنوع الضغط أيضًا؛ إذ يرتفع في الجو المعتدل وينخفض في الجو العاصف. إن الاستعارة التي تقول «الزئبق ينخفض» صحيحة حرفيًّا. أما القول إن الطبيعة تمقت الفراغ، الذي شدد عليه الفلاسفة الدينيون والتاريخيون، فقد صار نسيًا منسيًّا. وكما أشار باسكال نفسه، لا تمقت الطبيعة الفراغ على قمة الجبل بدرجة أقل مما تمقته عند الوادي، أو في المناخ الرطب أكثر من المناخ المشمس: إنما وزن الهواء هو المسئول عن حدوث كل الظواهر التي أرجعها الفلاسفة إلى «سبب خيالي».

هوامش

(1) Mary Evans Picture Library.

الفصل الثاني

ما مدى فراغ الذرة؟

الإلكترون

عُرفت الظواهر الكهربائية منذ آلاف السنين، غير أن أسرار إبرة البوصلة المغناطيسية، ووميض البرق، وطبيعة الكهرباء ظلت دون تفسير حتى انقضاء سنوات عديدة من القرن التاسع عشر. لُخص الموقف قرب نهاية ذاك القرن في كتاب ابتعته من متجر للكتب المستعملة حين كنت طفلًا مقابل سنت. نُشر الكتاب الذي يحمل عنوان «أسئلة وأجوبة في العلوم» في عام ١٨٩٨، وردًّا على سؤال «ما الكهرباء؟» يجيب الكاتب بأسلوب العصر الفيكتوري الميلودرامي قائلًا إن «الكهرباء سائل يستحيل قياسه بدقة، وطبيعته لغز للإنسان». يا له من فارق ذلك الذي تصنعه مائة عام! إن الاتصالات الإلكترونية الحديثة والصناعات كافة هي نتاج اكتشاف طومسون للإلكترون عام ١٨٩٧، الذي أجاب عن السؤال المطروح سابقًا قبل نشر ذلك الكتاب بعام كامل. لكم تنتقل الأخبار على نحو أسرع هذه الأيام.

تتدفق الإلكترونات عبر الأسلاك في صورة تيارات، وهي تشغِّل المجتمع الصناعي، وتنتقل عبر متاهات جهازنا المركزي العصبي وتحفظ وعينا، وتعد مكونات أساسية في ذرات المادة، وعلى حركتها من ذرة إلى أخرى تقوم الكيمياء والبيولوجيا والحياة.

الإلكترون جسيم أساسي للمادة بجميع صورها، وهو أخف الجسيمات ذات الشحنة الكهربائية، وهو مستقر، وموجود في كل مكان. تتحدد أشكال كل البنى الصلبة من خلال الإلكترونات الدائرة في المحيط الخارجي للذرات. توجد الإلكترونات في كل شيء، لذا من قبيل المفارقة أن جاء اكتشاف هذا المكون الأساسي للمادة ثمرة للقدرة التي طُورت في القرن التاسع عشر بغية التخلص من المادة، لصنع الفراغ.

لزمن طويل كان هناك وعي متنام بأن المادة لها خصائص غامضة، مع أن هذا الوعي لم يتطرق في البداية إلى مسألة الفراغ مباشرة. وكان الإغريق القدامى على دراية بالفعل ببعض من هذه الخصائص، مثل قدرة الكهرمان (الإلكترون هو الكلمة اليونانية للكهرمان) على جذب والتقاط قصاصات الورق عند حكه بالفرو. في صورة أحدث لهذه التجربة، صفف شعرك بسرعة بمشط، وإذا كان اليوم جافًّا يمكنك أن تتسبب في تطاير بعض الشرر. يتمتع أيضًا الزجاج والأحجار الكريمة بهذه الخاصية السحرية المتمثلة في التعلق بالأشياء بعد الاحتكاك. بحلول العصور الوسطى عرف البلاط الملكي في أوروبا أن العديد من المواد تتشارك هذا الجذب الغريب بعد الاحتكاك فحسب. وهذا بدوره أدى بويليام جيلبرت، طبيب البلاط الخاص بالملكة إليزابيث الأولى، أن يقترح أن المادة تحتوي على «قدرة كهربية» وأن الكهرباء هي «سائل يستحيل قياسه» (كما ذُكر في الكتاب الذي ابتعته والصادر عام ١٨٩٨) يمكنه أن ينتقل من مادة إلى أخرى بالاحتكاك. أما عن اكتساب أو فقدان هذه القدرة الكهربية فهو يرتبط بكون الجسم «مشحونًا» بشحنة موجبة أو سالبة.

في أمريكا استهوت الظواهر الكهربية، لا سيما البرق، بنجامين فرانكلين، الذي استقطع لها بعضًا من الوقت المخصص لصياغة دستور ما أصبح فيما بعد الولايات المتحدة الأمريكية. السحابة الرعدية هي مولد إلكتروستاتيكي طبيعي قادر على خلق ملايين الفولتات والشرارات القاتلة. أدرك فرانكلين أن الأجساد تحتوي على قوة كهربية خفية يمكن نقلها من جسد لآخر. لكن لم يعرف أحد كنه هذا السائل الذي يستحيل قياسه.

ندرك اليوم أنه بفضل الإلكترونات — التي تسهم بأقل من جزء على الألفين من كتلة الذرة العادية، ومن ثم نسبة ضئيلة منها فقط هي التي تشترك في التيار الكهربائي — يكون التغيير الحادث في كتلة الجسم عندما يُشحن كهربائيًّا ضئيلًا للغاية، لدرجة لا يمكن رصدها. كيف يمكن إذن عزل هذا السائل الذي يستحيل قياسه، وتصنيفه، ودراسته؟

تتدفق الكهرباء عادة عبر الأشياء، كالأسلاك، ولمَّا كان مستحيلًا أن ننظر داخل الأسلاك، تولدت فكرة التخلص من الأسلاك والنظر إلى الشرر الكهربي. أظهر البرق أن التيار الكهربائي يمكنه أن ينتقل عبر الهواء، ومن هنا جاءت فكرة أن تدفق التيار الكهربائي يمكن أن ينكشف في «الهواء الطلق»، بعيدًا عن الأسلاك المعدنية التي عادة ما توصله وتخفيه.

لذا شرع العلماء في توليد الشرر في الغازات الموجودة داخل أنابيب زجاجية. نقل الهواء في الضغط الجوي العادي التيار الكهربائي، لكنه حجب تدفق الإلكترونات. وبالتخلص التدريجي من الغاز، كان من المرجو أن يتبقى التيار الكهربائي وحده في آخر المطاف. وفي أعقاب الثورة الصناعية وتطوير مضخات تفريغ أفضل ظهرت أطياف غريبة، عندما كهرب العلماء الغاز الرقيق في أنابيب التفريغ. وهكذا أفصحت الكهرباء عن أسرارها شيئًا فشيئًا. أنتج التيار عند واحد على خمسة عشر من الضغط الجوي سحبًا مضيئة تطفو في الهواء، مما أقنع الفيزيائي الإنجليزي ويليام كروكس أنه كان ينتج الإكتوبلازم، المادة التي كانت تحبذها بشدة جلسات استحضار الأرواح في العصر الفيكتوري، وعليه تحوَّل إلى تحضير الأرواح.

اعتمدت ألوان الأضواء في هذه الأطياف الخافتة على نوع الغاز، مثل الضوء الأصفر للصوديوم والأخضر للزئبق في الإضاءات المألوفة الحديثة. تنتج هذه الأطياف عندما يصطدم تيار الإلكترونات بذرات الغاز محررًا الطاقة منها على صورة ضوء. ومع انخفاض ضغط الغاز أكثر اختفت الأضواء أخيرًا، غير أنه تكوَّن لون أخضر زاهٍ خافت على السطح الزجاجي قرب مصدر التيار. وفي عام ١٨٦٩ جرى التوصل إلى اكتشاف هام مفاده أن الأشياء الموجودة داخل الأنبوب تلقي ظلالًا ذات وهج أخضر داخل الأنبوب، مما يثبت أن هناك أشعة متحركة تنبعث من مصدر التيار الكهربائي وترتطم بالزجاج إلا عندما تعترض الأشياء طريقها. اكتشف كروكس أن المغناطيس من شأنه أن يحرف الأشعة، مما يثبت أن المغناطيس يحمل شحنة كهربية، وفي عام ١٨٩٧ استطاع جيه جيه طومسون باستخدام كلتا القوتين المغناطيسية والكهربائية (عن طريق توصيل طرفي بطارية بلوحين معدنيين داخل الأنبوب) أن يحرك الشعاع (وهذا هو النموذج البدائي لجهاز التليفزيون). وبتعديل القوى المغناطيسية والكهربائية استطاع أن يتوصل إلى خصائص مكونات التيار الكهربائي. ومن ثم اكتشف الإلكترون ذا الكتلة الضئيلة حتى إذا قورنت بكتلة ذرة الهيدروجين، أخف عنصر. وبفضل عمومية نتائجه، التي لم تتغير مع تغير الغاز المتبقي في الأنبوب أو الأسلاك المعدنية التي توصل التيار الكهربائي إلى أنبوب التفريغ، استنتج أن الإلكترونات هي مكونات مشحونة كهربيًّا موجودة في كل الذرات.

وما إن عُرف أن الإلكترونات أخف ألفي مرة على الأقل من أصغر الذرات، حتى فهم العلماء لغز تدفق الكهرباء بسلاسة عبر الأسلاك النحاسية. أطاح وجود الإلكترون

للأبد بالتصور العتيق عن الذرات باعتبارها أصغر الجسيمات، وأماط اللثام عن التركيب الداخلي المعقد للذرة، حيث تحوم الإلكترونات حول نواة مضغوطة مركزية.

قذف فيليب لينارد الذرات بأشعة من الإلكترونات ووجد أن الإلكترونات اخترقتها كما لو لم يكن يعترض طريقها شيء. لخص لينارد هذا الموقف الذي يكاد يكون متناقضًا — تبدو المادة صلبة وفي الوقت نفسه شفافة على المقياس الذري — بقوله إن «المساحة التي يشغلها متر مكعب من البلاتين الصلب هي فارغة بقدر فراغ الفضاء النجمي خارج كوكب الأرض».

انظر إلى النقطة الموضوعة بنهاية هذه الجملة. يحتوي حبرها على نحو مائة مليار ذرة من الكربون، ولكي ترى ذرة واحدة منها بالعين المجردة لا بد أن تكبِّر النقطة حتى يصل قطرها إلى ١٠٠ متر. ومع أن هذا التكبير هائل، فإنه يظل بالإمكان تخيله. لكن لكي ترى نواة الذرة، لا بد أن تكبر النقطة حتى يصل قطرها إلى ١٠ آلاف كيلومتر؛ أي ما يعادل المسافة بين قطبي كوكب الأرض.

يمكن أن تقدم ذرة الهيدروجين، أبسط الذرات، تصورًا عن المقاييس والفراغ الموجود بالذرة. فالنواة المركزية جسيم واحد موجب الشحنة يُعرف بالبروتون، وما يحدد الإطار الخارجي للذرة هو مدار الإلكترون، البعيد عن البروتون المركزي. بالانتقال بعيدًا عن مركز الذرة، حين نصل إلى حافة البروتون نكون قد قطعنا واحدًا على العشرة آلاف من الرحلة. في آخر المطاف نصل إلى الإلكترون البعيد الذي يكون ضئيل الحجم أيضًا، إذ لا يتجاوز حجمه واحدًا على الألف من حجم البروتون، أو واحدًا على عشرة ملايين من حجم الذرة. وهكذا، بوصولنا إلى الفراغ شبه التام، الذي أفضى بدوره إلى اكتشاف أن المادة الذرية تحوي إلكترونات، يبدو أننا عدنا إلى نقطة البداية باكتشاف أن الذرة فراغ شبه تام: إذ إن ٩٩,٩٩٩٩٩٩٩٩٩٩٩٩٩ في المائة منها فراغ. ومن ثم، تكاد مقارنة لينارد لا تفي فراغ الذرة حق قدره؛ فكثافة ذرات الهيدروجين في الفضاء الخارجي هائلة مقارنة بكثافة المادة الجسيمية داخل كل ذرة من تلك الذرات!

نواة الذرة هي أيضًا شيء هش سريع الزوال. كبِّر النيوترون أو البروتون ألف مرة وسوف تجد أنهما أيضًا يتمتعان بتركيب داخلي غني. ومثل سرب النحل الذي يُرى من بعيد على أنه بقعة سوداء في حين أن النظر إليه عن كثب يكشف ما يتمتع به من طاقة صاخبة، هكذا الحال مع النيوترون والبروتون أيضًا. يبدو هذان الجسيمان من بعد كبقعتين بسيطتين، لكن عند النظر إليهما في ظل درجة وضوح عالية يتبين أنهما

يتألفان من عناقيد من الجسيمات الأصغر التي تُسمى الكواركات. اضطررنا أن نكبر النقطة حتى قطر ١٠٠ متر كي نرى الذرة، وحتى قطر كوكب الأرض كي نرى النواة، ولنرى الكوارك لا بد أن نكبر النقطة حتى القمر، ثم نستمر في التكبير لضعف هذه المسافة عشرين مرة.

الكوارك صغير مقارنة بالبروتون أو النيوترون بقدر ما يكونان هما مقارنة بالذرة. وما بين النواة المضغوطة المركزية والإلكترونات التي تدور حولها عن بعد، تعد الذرات خاوية بشكل شبه تام من المنظور الجسيمي، ويُمكن أن يُقال نفس الشيء عن الأجزاء الداخلية للنويات الذرية. خلاصة القول، التركيب الأساسي للذرة يتجاوز حدود التصور الواقعي، وفراغها عميق.

ما مدى فراغ الذرة؟

تعرف «المنظمة الأوروبية للأبحاث النووية» اختصارًا باسم «سيرن». عندما بدأت هذه المنظمة عام ١٩٥٤، كانت النويات الذرية تمثل حدود الفيزياء ومن ثم استخدمت صفة «نووية» على نحو ملائم في اسم المنظمة. لكن اليوم، انتقل تركيز الأبحاث إلى مستوى أعمق؛ إلى الكواركات التي تشكل بروتونات ونيوترونات نواة الذرة والعديد غيرها من الجسيمات سريعة الزوال. وتأكيدًا على المهمة التي يسعى نحوها، يُعرف المختبر الآن باسم «المنظمة الأوروبية لفيزياء الجسيمات»، الأمر الباعث على المزيد من الراحة أيضًا لمن يرون في كلمة «نووية» صبغة «بغيضة». عند بلوغ سيرن من جهة جنيف، نجد مكاتب المعمل على أحد جانبي الطريق في حين نجد في الحقول المقابلة مبنى كرويًّا غريب الشكل، يبلغ ارتفاعه نحو عشرين مترًا ولونه بني داكن يبدو للوهلة الأولى كالمفاعل النووي. من بعيد يبدو المبنى صدئًا مهجورًا، لكن بالتحقق منه عن كثب يتبين أنه مصنوع من الخشب ومكتوب عليه باللغة الفرنسية «لو جلوب»؛ أي الكرة الأرضية.

بدأ لو جلوب نشاطه كمعرض في مكان آخر بسويسرا. وعند إغلاقه، أُثير سؤال ما الذي يمكن فعله بهذا المكان، وعليه تقرر منحه إلى سيرن كمعرض لأنشطتها بدلًا من تدميره. لم ترد إدارة سيرن أن ترفض العرض، لذا قبلته دون أن يكون لديها خطة واضحة بشأن ملايين الفرانكات التي سيتكلفها أي معرض دائم. اقترح أحد العلماء أن تتحول هذه الإشكالية إلى ميزة: فمبنى «لو جلوب» كرة مجوفة ... فارغة، ولَمَّا كان علماء سيرن خبراء في الذرة، ليكن إذن مبنى «لو جلوب» الفارغ هو نفسه رمزًا للذرة. بل من

الأفضل تعليق كرة صغيرة قطرها ملليمتر، لا تتجاوز تكلفتها فرانكات معدودات، في منتصف مبنى «لو جلوب»، من خلالها «يختبر» الزوار مدى فراغ الذرة؛ إذ تمثل الكرة الصغيرة النواة وجدران «لو جلوب» تمثل الحدود الخارجية للذرة. ولا بأس من إنفاق بضعة فرانكات أخرى على أشعة ليزر تُشغل على الجدران لتعرض تدفق الإلكترونات. وإذا فرضت رسم دخول على الزوار فسيشعر فلاسفة ما بعد الحداثة بالرضا.

لم يجر تبني هذه الفكرة، وبالتالي لم يدفع الأشخاص العاديون المال لدخول قطعة فنية توهُّمًا أنهم سيختبرون الفراغ الداخلي لذرة. بدلًا من ذلك، استُضيفت المعارض المؤقتة المرتبطة بأنشطة سيرن المختلفة، في هذه البناية الرديئة. لكن لنفترض أنه جرى تبني الاقتراح الجريء وسافرت أنت عبر القارة الأوروبية بغية أن تجرب الغموض الموجود بداخل الذرة، ودفعت رسوم الدخول، ودخلت الكرة الخشبية ووجدت، لا شيء: هل كنت ستطالب باسترداد قيمة الرسوم أم ستشعر أنك اختبرت حقيقة عظيمة؟

صحيح أن الذرات فراغ هائل، لكن هذا فقط من منظور الجسيمات التي بداخلها، وهذا ليس سوى جزء من الحقيقة؛ فالفراغ الداخلي مليء بمجالات القوى الكهربائية والمغناطيسية التي تتمتع بقوة هائلة من شأنها أن تمنعك إذا حاولت الدخول. وهذه القوى هي التي تمنح الصلابة للمادة على الرغم من الافتراض بأن ذراتها «فارغة». وأنت تقرأ هذا الكتاب جالسًا، تفصل بينك وبين ذرات الكرسي الذي تجلس عليه مسافة ذرة واحدة بسبب تأثير هذه القوة.

إن الذرة غير فارغة بالمرة. ونواة الذرة مصدر لمجالات كهربائية قوية تملأ المساحات «الفارغة» الأخرى داخل الذرة. اكتُشف هذا في عام ١٩٠٦. كان رذرفورد قد لاحظ أنه عندما اخترق شعاع من جسيمات ألفا (حزم محكمة مؤلفة من بروتونين ونيوترونين) موجبة الشحنة صحائف رقيقة من الميكا، تكونت صورة ضبابية على شريحة فوتوغرافية، مما رجح أن الميكا بعثرتها وأنها انحرفت عن مسارها. أثار هذا الدهشة لأن جسيمات ألفا كانت تسير بسرعة ١٥ ألف كيلومتر في الثانية، أو ما يعادل واحدًا على اثني عشر من سرعة الضوء، وكانت تملك طاقة هائلة مقارنة بحجمها. بإمكان المجال الكهربائي أو المغناطيسي القوي أن يحرف جسيمات ألفا بمقدار بسيط، لكن ما من شيء يمكنه التسبب في انحرافها بالقدر الذي تنحرف به بعد أن تخترق بضعة ميكرومترات (جزء من مليون من المتر) من الميكا. ظن رذرفورد أن المجالات الكهربائية داخل الميكا تتمتع قطعًا بقوة هائلة مقارنة بأي شيء أخر عرُف حينذاك. والمجالات التي تتمتع بمثل هذه

القوة في الهواء من شأنها أن تتسبب في تطاير الشرر، والتفسير الوحيد الذي أمكنه أن يفكر فيه هو أن هذه المجالات الكهربية القوية لا بد أن توجد فقط في مناطق شديدة الصغر، أصغر حتى من الذرة.

ومن هنا خرج بتخمينه الرائع: أن هذه المجالات الكهربية الشديدة هي التي تحبس الإلكترونات في سجونها الذرية، وهي القادرة على التسبب في انحراف جسيمات ألفا شديدة السرعة.

في عام ١٩٠٩، كلف رذرفورد أحد تلاميذه الشباب، ويدعى إرنست مارسدن، بمهمة اكتشاف هل تنحرف أشعة ألفا بزوايا كبيرة للغاية. استخدم مارسدن رقائق من الذهب بدلًا من الميكا، وشاشة وامضة كي تكشف أشعة الألفا المتبعثرة. وقد استطاع أن يحرك الشاشة ليس فقط خلف رقائق الذهب، بل أيضًا إلى الأجناب والدوران بجانب المصدر الإشعاعي نفسه. وبهذه الطريقة استطاع أن يكشف أشعة ألفا المرتدة بزوايا كبيرة.

ما أثار دهشة الجميع أن مارسدن اكتشف أن جسيمًا واحدًا من بين كل ٢٠ ألف جسيم ارتد إلى الخلف نحو الاتجاه الذي أتى منه ليرتطم بالشاشة عندما كانت بجانب مصدر الإشعاع. كانت هذه نتيجة رائعة؛ فقد أمكن التسبب في انحراف جسيمات ألفا، التي كادت لا تتأثر على الإطلاق بأشد القوى الكهربية المعروفة حينها، رجوعًا نحو مصدرها عن طريق صحيفة ذهبية رقيقة لا يتعدى سمكها بضع مئات من الذرات! لا غرابة إذن في أن رذرفورد تعجب قائلًا: «الأمر أشبه بإطلاق قذيفة قطرها ١٥ بوصة نحو قطعة من ورق الحمام فارتدت للخلف وصدمتك».

بعد أن أمضى رذرفورد أشهرًا عديدة في محاولة فهم هذه الملاحظات، توصل إلى تفسيرها عن طريق عملية حسابية غاية في البساطة. كمُنَ خيط حل المعضلة في معرفة طاقة جسيمات ألفا الآتية. كان يعرف أيضًا أن كل جسيم من جسيمات ألفا يحمل شحنة موجبة مضاعفة. ولا بد أن الشحنة الموجبة في ذرات الذهب تتنافر مع جسيمات ألفا التي تقترب منها فتبطئ من سرعتها وتحرفها. وكلما اقتربت جسيمات ألفا أكثر من الشحنة الموجبة في الذرة، زاد انحرافها إلى أن تقف في الحالات القصوى ثم ترتد عائدة من حيث أتت.

تمكن رذرفورد من حساب مدى القرب من الشحنة الموجبة الذي ينبغي أن تكون عليه جسيمات ألفا، وقد أذهلته النتيجة. ففي حالات نادرة كانت جسيمات ألفا على بعد واحد على مليون المليون من السنتيمتر من مركز الذرة، أي على بعد واحد على عشرة

آلاف من قطر الذرة، قبل أن ترتد. كان هذا هو ما أوضح أن الشحنة الموجبة تتمركز في منتصف الذرة بالضبط، وأدى إلى صورة الذرة «الفارغة» من منظور الجسيمات، والممتلئة في الوقت نفسه بالمجال الكهربائي؛ فما «المجال» إذن؟

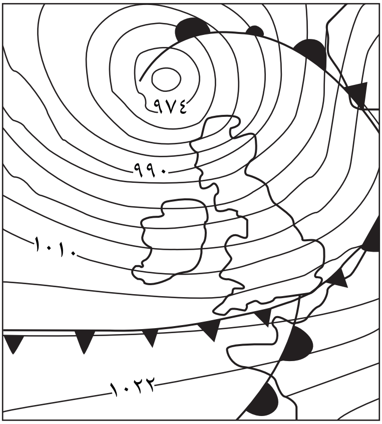
المجالات

المعجبون بالموسيقي جان ميشل جار يعرفون ألبومه الصادر بعنوان «مجالات مغناطيسية». يدرك العامة بوجود ما يسمى بمجالات الجاذبية، التي تعرف في أدب الخيال العلمي بأنها: «مجالات منحنية في مُتَّصَل الزمكان». يوحي هذا بحدوث الكثير من التأثيرات في ذلك الفراغ المفترض. كي نعرف ما هذه التأثيرات، لا بد أن نكون أولًا قادرين على تعريف ما يعنيه العلماء بلفظة «مجال». من الأسهل أن نتصور معنى المجال حين نكون بصدد شيء محدد؛ لنعد إذن إلى الأرض والضغط الجوي.

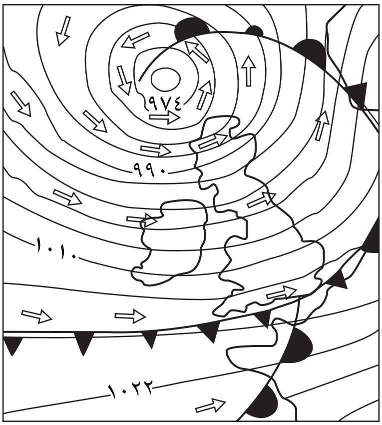
تعد خريطة ضغط الهواء، التي يألفها كل أولئك المهتمين بالتوقعات الجوية، مثالًا على المجال كما يعرفه علماء الرياضيات؛ مجموعة أعداد تختلف من نقطة لأخرى، وتمثل الأرقام في هذه الحالة الضغط البارومتري عند كل نقطة في البلد. ومثل خريطة الخطوط الكنتورية، يمكن ضمُّ النقاط التي يتساوى فيها الضغط من خلال خطوط تساوي الضغط المعروفة باسم الأيزوبار: حيث أيزو تعنى المتساوي، وبار تعنى الوزن أو الضغط.

إذا كان كل ما يحتاجه الأمر لتعريف المجال هو مجموعة من الأرقام، كما في هذه الحالة، عندئذ يُعرف المجال على أنه «مجال عددي». يتسبب معدل تغير الضغط في حدوث الرياح؛ فعندما تتباعد خطوط الأيزوبار يكون النسيم عليلًا، في حين أنه عندما تتقارب بشدة ومن ثم يكون التغير في الضغط سريعًا، تصبح الريح أكثر عصفًا. وخريطة سرعة الرياح هي مثال على ما يُعرف بـ «المجال الموجه»، وهي تتضمن كلًّا من العدد والاتجاه عند كل نقطة، على سبيل المثال، سرعة الرياح واتجاهها (انظر الشكل ٢-١).

في حالة الضغط الجوي والرياح يوجد وسط مادي؛ الهواء، الذي تحدد كثافته المتغيرة المجالات، وبمقدورنا تصور حقيقة ذلك النموذج على أرض الواقع. يسري مفهوم «المجال» حتى عندما ينعدم الوسط المادي. وهذه هي الفكرة التي يقوم عليها كل من مجال الجاذبية والمجال الكهربائي، اللذان يوفران الثقل والاتجاه لكلتا القوتين على حدة في الفضاء.



(أ)



(ب)

شكل ٢-١: (أ) خريطة طقس تبين خطوط الأيزوبار الخاصة بالضغط؛ (ب) خريطة تبين أيضًا متجهات الرياح-السرعة.

لدى هواة نزهات السير الخلوية الطويلة ومتسلقي الجبال وعي بمجال الجاذبية؛ فكلما كنت على ارتفاع أعلى من جانب الجرف، كان السقوط أعظم. هذا هو المثال العملي، أما خريطة الخطوط الكنتورية التي توضح الارتفاع فوق سطح البحر فتمثل الجانب النظري. تخيل ذلك المشهد الطبيعي ذا التلال والأودية. إن خطوط الأيزوبار في الرسم البياني الخاص بأحوال الطقس تعد بمثابة خريطة توضح الخطوط الكنتورية للنقاط متساوية الارتفاع فوق مستوى سطح البحر. عندما تقفز في البحر دون عائق، كلما كنت على ارتفاع أعلى زادت سرعة اختراقك للماء، وزادت «طاقتك الحركية». على أي ارتفاع مبدئي فوق سطح البحر أنت تملك طاقة وضع، وهذه الطاقة تمثل «إمكانية» اكتسابك لكمية من طاقة الحركة، وكلما زاد تأثير قوة الجاذبية عليك تعاظمت طاقة الحركة التي تكتسبها. وبالتالي تكون الخطوط الكنتورية في الخريطة هي خطوط للنقاط التي لها نفس طاقة الوضع، والمعروفة باسم «النقاط متساوية الجهد».

تحت تأثير قوة الجاذبية تكون الحركة الطبيعية هي السقوط إلى أسفل التل؛ من الجهد العالي إلى المنخفض. وتتناسب قوة العجلة طرديًّا مع معدل التغير الحادث في الجهد: المتمثل في منحدر التل. فعندما تسقط من تل شديد الانحدار فإنك تكتسب سرعة أكبر من تلك التي تكتسبها عند هبوط منحدر طفيف الانحدار. هذه خاصية عامة: إذ تتناسب القوة طرديًّا مع معدل تغير طاقة الوضع، مثلما تتناسب قوة الرياح طرديًّا مع درجة انحدار الأيزوبار. وبهذا تحدد خريطة درجة الانحدار عند كل نقطة كلًّا من المقدار (منحدر أم مسطح) والاتجاه (هل واجهة هذا المنحدر نحو الشمال أم الجنوب). هذا المجال، الذي يلخص القوة في كل من المقدار والاتجاه، هو مجال موجه.

تمثلت فكرة إسحاق نيوتن العبقرية في أن الجاذبية هي التي تحكم حركة التفاح المتساقط وحركة الكواكب. فالشمس هي مركز الجذب العظيم في قلب المجموعة الشمسية. وإذا حدث أن انجذبت ناحية الشمس بفعل قوة جاذبيتها، فهذا يعني أنه كلما بدأت حركتك من مكان أبعد، زادت سرعتك لدى ارتطامك بالشمس. وبالتالي تزيد طاقة الوضع كلما ابتعدت عن الشمس. يتكون مجال جاذبية متساويات الجهد من مجموعة من الكرات في مركزها الشمس. ينخفض الجهد مع التحرك نحو الداخل، ومن ثم تتسارع حركتك من منطقة عالية الجهد إلى منطقة منخفضة الجهد. ويعوض الارتفاع في طاقة الحركة الفقد في طاقة الوضع. هذا قانون كوني.

ينطبق المفهوم عينه على الشحنة الكهربائية والمجال الكهربائي، بدلًا من الشمس العملاقة والجاذبية. كلنا نعرف مفهوم فرق الجهد الكهربي (الفولت) حتى وإن كنا لسنا

متأكدين تمامًا من تعريفه. يعادل الجهد الكهربائي الجهد العالي، في هذه الحالة «الجهد» المبذول لإحداث صدمات كهربائية هي نتاج التحريك المفاجئ للشحنات الكهربائية، والتي تُلاحَظ كانقباض في العضلات. إذا كانت ألواح إحدى البطاريات لها جهد كهربائي موجب وسالب، عندئذ كلما كانت الألواح أقرب بعضها إلى بعض، زاد المجال الكهربائي، أي معدل تغير الجهد. وبينما يكون لدينا في حالة الهواء وسط مادي يساعدنا في تكوين صورة ذهنية، فإنه في حالة الجاذبية أو المجالات الكهربائية لا يوجد وسط، وإنما لدينا مفهوم وتجارب تدل على تأثيراتها، لكن لا يوجد «شيء» واضح لنتصوره. إلا أن تأثيرات مجال الجاذبية والمجال الكهربائي قابلة للقياس وهما موجودان.

حجم المجال

لتكوين فكرة عن مدى قوة المجالات الكهربائية داخل الذرات، دعونا نقارنها بما يمكن أن تفعله التكنولوجيا في العالم المرئي الأكبر. يصل المجال الكهربائي المتولد في بطارية كتلك التي قد تستخدمها في كشاف أو لتشغيل جهاز راديو — والتي تعطي عددًا قليلًا من الفولتات، وفيها تفصل ملليمترات قليلة بين الألواح الكهربائية الموجبة والسالبة — إلى ألف فولت للمتر. في «مركز معجل ستانفورد الخطي» بكاليفورنيا، تزيد المجالات الكهربائية من سرعة الإلكترونات لتصل سرعتها إلى حوالي ٣٠٠ ألف كيلومتر في الثانية، أي أقل بجزء على الألف من سرعة الضوء. ولعمل هذا تمر الإلكترونات عبر حوالي ٣٠ مليار فولت بطول ٣كم، ما يعادل مجالات كهربائية جهدها ١٠ ملايين فولت لكل متر. توفر هذه التكنولوجيا المعقدة مجالات كهربائية أقوى للغاية من المجالات الموجودة في البطارية البسيطة، لكنها ضئيلة مقارنة بالمجالات الموجودة داخل الذرة. في «مركز معجل ستانفورد الخطي» يصل المجال الكهربائي إلى عشرة فولتات في كل جزء على المليون من المتر؛ وداخل ذرة الهيدروجين على سبيل المثال، يصل الجهد الكهربائي في الفجوة التي تفصل الإلكترون عن البروتون إلى عشرة فولتات، ومساحة هذه الفجوة في المتوسط تبلغ عشرة أجزاء على المليار من المتر فحسب. أي إن قوة المجالات داخل الذرات تزيد ألف مرة عما يمكن أن تصل إليه تكنولوجيتنا، مع أن هذه المجالات قاصرة على الذرة وحسب.

تقول القاعدة الشهيرة عن الشحنات الكهربائية إن الأضداد تتجاذب والأشباه تتنافر. يوجد كلا النوعين من الشحنات داخل الذرات: إلكترونات سالبة الشحنة في المحيط الخارجي ونواة موجبة الشحنة في المركز. وعندما تقترب الذرات بعضها من

بعض، فإن النواة موجبة الشحنة تجذب الإلكترونات سالبة الشحنة الخاصة بالذرة المجاورة، مما يسبب اقتراب الذرتين قليلًا. وعليه تتشابك مجموعات الذرات بالتبادل وتتكتل معًا مكونة جزيئات، وأخيرًا مادة متماسكة. إن أقوى المجالات الكهرومغناطيسية التي يمكننا أن نولدها الآن على المستوى المرئي ضعيفة نسبيًّا مقارنة بتلك الموجودة داخل الذرات نتيجة للتأثيرات المُعادِلة للشحنات الموجبة والسالبة: فداخل حدود الذرة تتحقق القوة الكاملة للشحنات المضادة دون أي عائق. وإذا أدركنا هذا، فلا نتعجب إذن من أنه يمكن التسبب بانحراف جسيمات ألفا — حتى عندما تتحرك بسرعة ١٤ ألف كيلومتر في الساعة؛ أي واحد على عشرين من سرعة الضوء — بزوايا كبيرة، بل يمكن إيقافها وردها من حيث جاءت: فالمجالات الكهربائية داخل الذرة تشكل حاجزًا يستحيل اختراقه.

لكي تستكشف الذرة من الداخل، لا بد من تفحصها باستخدام شيء أصغر منها بكثير، لهذا استخدم رذرفورد جسيمات ألفا. بيد أن تلك الجسيمات لم تعثر على فراغ، بل صُدت كما لو كانت الذرة محشوة بوسط صلب مقاوم، وهكذا أعلن المجال الكهربائي عن نفسه. ربما أزال تورشيللي الهواء من مكان ما، لكن إذا قربنا الصورة من أي من الذرات المتبقية فسنلاحظ أنه قطعًا يوجد «شيء ما» على صورة مجال كهربائي شديد. يوجد تأثير ما في الفضاء ينجم عن وجود النويات الذرية المشحونة كهربائيًّا، وهذا التأثير يظل باقيًا حتى عند إزالة كل المواد الأخرى.

تنشأ عن الشحنات الكهربائية المتحركة القوى المغناطيسية، التي يمكن أن تمتد آثارها عبر مساحات شاسعة كما الحال في المجال المغناطيسي لكوكب الأرض. يدور القلب المعدني المنصهر لكوكبنا حول ذاته مع حركة الكوكب، فتُشَتِّت الحرارة ذراته بما يسبب تدفق إلكتروناتها بحرية. تحول التيارات الكهربائية الناجمة كوكب الأرض إلى مغناطيس ضخم له قطبان شمالي وجنوبي، وأذرع مغناطيسية تمتد في الفضاء. هذا المجال المغناطيسي للأرض، الذي هو أقوى من الجاذبية بكثير، يحرك إبرة البوصلة الصغيرة. ولطالما أعانت هذه الظاهرة المسافرين والطيور المهاجرة منذ فجر الزمان. وكانت هذه التأثيرات معروفة في القرن السابع عشر حتى ورحلة البحث عن الفراغ جارية. وقد ثبت أن التأثيرات المغناطيسية والضوء يمكنها الانتقال عبر الفراغ، مع أن العلاقة الوثيقة بين الضوء والمجالين الكهربائي والمغناطيسي لم تُعرف حتى القرن التاسع عشر.

تظل المجالات المغناطيسية موجودة على ارتفاع آلاف الكيلومترات فوقنا، حيث تكون طبقة الهواء في غاية الرقة، بل تكاد تكون منعدمة. ووجود هذه المجالات غاية في الأهمية لبقائنا؛ فهي تصد الأشعة الكونية والتيارات الشمسية التي تتألف من جسيمات مشحونة كهربائيًّا. وبهذا تمثل درعًا واقيًا مهمًّا؛ لأن التعرض لهذه الإشعاعات من شأنه أن يدمر الحمض النووي للبشر. ولو حدث أن اختفى المجال المغناطيسي للأرض، كما الحال في كوكب المريخ، من الممكن أن تكون هذه نهاية نوعنا.

أثبت كل من باسكال وبيرير أنه يوجد فراغ خارج الأرض؛ بمعنى أنه لا يوجد هواء. لا يوجد غاز في الفضاء الخارجي أو يوجد القليل منه للغاية، لكن الأكيد هو أنه يوجد مجال مغناطيسي أرضي له أهمية عظيمة.

مجالات الجاذبية وقانون التربيع العكسي

الجاذبية هي أكثر قوة معروفة، لكنها فعليًّا غاية في الضعف؛ فمن السهل أن ترفع تفاحة إلى أعلى متغلبًا بذلك على قوة جذب الكوكب بأكمله. وتنبع قوتنا العضلية من القوى الكهربائية الأقوى من قوة الجاذبية بكثير التي تمنحنا الهيئة التي نحن عليها. غير أن التجاذب والتنافر الذي يحدث بين الشحنات الموجبة والسالبة داخل المادة يبطل بعضه بعضًا، في حين أن قوة الجذب التي تؤثر على كل ذرة داخل أي جسم كبير تتعاظم. ومتى زاد قطر الجسم عن ٥٠٠ كيلومتر تكون السيادة لقوة الجاذبية.

لَمَّا كانت الجاذبية لا تأبه بالاتجاه، وتعمل بالمقدار نفسه في الأبعاد الثلاثة، فهي بذلك تجعل الأجسام كروية. هذا هو الحال مع الشمس، فالنتوءات والأودية الموجودة على كوكب الأرض ما هي إلا تعاريج ظهرت على السطح بفعل التأثيرات الجيولوجية، ويرجع انبعاج شكل الكوكب إلى دورانه حول ذاته مرة كل يوم.

بالنسبة للأجسام هائلة الحجم تتعاظم تأثيرات الجاذبية بدرجة كبيرة. فتستطيع الشمس، التي لا تتعدى حجم ظفر الإبهام عند رؤيتها من الأرض، أن تأسرنا بجاذبيتها نحن والكواكب الأخرى في رقصة كونية عبر الفضاء الفسيح على الرغم من ابتعادنا عنها مئات الملايين من الكيلومترات. كيف ينتشر هذا التأثير عبر الفضاء؟

كان إسحاق نيوتن صاحب الفكرة العبقرية التي تقضي بأن قوة الجاذبية بين جسمين تتناسب عكسيًّا مع مربع المسافة بينهما. ويعد «قانون التربيع العكسي» المتعلق بضعف تأثير الجاذبية مع زيادة المسافة غاية في الأهمية لبنية الكون، وربما أيضًا لتطور

علم الفيزياء. نحن أسرى كوكب الأرض الذي يدور حول الشمس، وللقمر صغير الحجم لكن القريب نسبيًّا تأثير جذبوي يتمثل في ظاهرة المد والجزر، لكن مجرات النجوم النائية لا تؤثر تأثيرًا يُذكر علينا. فالمد والجزر، والكسوف، وطيران المركبات الفضائية كلها أمور يمكن تحديدها دون الحاجة إلى أخذ هذه الكتل البعيدة في الحسبان. ولو كانت قوة الجاذبية لا تعتمد على المسافة لكانت هذه المجرات البعيدة هي التي تحكمنا، وما كان كوكب الأرض ليستطيع أن يتماسك بفعل جاذبيته. ولو كانت الجاذبية تضعف على نحو مباشر مع زيادة المسافة لكان من الممكن أن نعيش على سطح أحد الكواكب الصخرية، لكن سيكون من العسير تخيل ما سيكون عليه تأثير قوة الجاذبية، فالقدرة على تجاهل تأثيرات كل الأجرام خلا اثنين فقط، في ظل تأثيرات طفيفة من جرم ثالث، هي التي مكنتنا من إجراء الحسابات وتحديد القواعد الأساسية المتعلقة بالجاذبية.

لا يقتصر قانون التربيع العكسي للقوة على الجاذبية وحدها: فالمبدأ عينه ينطبق على القوى الكهربائية بين أي جسيمين لهما شحنة. وفي ظل عدد الاحتمالات الأخرى الممكنة، من العجيب أن تعمل كل من القوة الكهربائية وقوة الجاذبية وفق قانون التربيع العكسي عينه. يرتبط السبب ارتباطًا وثيقًا بطبيعة الفضاء الثلاثية الأبعاد وحقيقة أن الجاذبية تملأ جميع أركانه، كما تملؤه المجالات الكهربائية على الأقل في المنطقة المجاورة لشحنة واحدة.

بطريقة أو بأخرى، يبعث الجسم الضخم، مثل كوكب الأرض أو الشمس، مجساته الجاذبة إلى الفضاء في كل الاتجاهات بالتساوي. يكاد يكون مدار الأرض حول الشمس مدارًا دائريًّا. تخيل أن الشمس موجودة في مركز كرة قطرها هو نفس قطر مدار كوكب الأرض. إن قوة الجذب التي يتعرض لها كوكبنا هي نفسها تمامًا في جميع أرجاء السطح الداخلي للكرة المُتخيلة. إذا تخيلنا أننا قد انتقلنا الآن إلى مدار يساوي ضعف مدار الأرض، فإن سطح الكرة المُتخيلة سيتضاعف أربع مرات لأن المساحة تزيد مع مربع المسافة. أدرك نيوتن أنه إذا شُبهت قوة الجاذبية بمجسات تخرج من المصدر في كل الاتجاهات بالتساوي، عندئذ ستنتشر قوة الجذب بالتساوي عبر مساحة الكرة المُتخيلة. ومع زيادة المساحة بمقدار مربع المسافة، تضعف قوة الجذب بالتبعية عند أي نقطة عليها.

من الواضح أنه يمكن صياغة مجموعة من الملاحظات الشبيهة بخصوص المجالات الكهربائية المنبعثة من جسم ذي شحنة كهربية.

تبرز هذه التشبيهات العلاقة الوثيقة بين سلوك هاتين القوتين وطبيعة الفضاء ثلاثية الأبعاد، والمعروفة منذ وقت نيوتن. وتقدم خيطًا مهمًّا لفهم لغز تولد قوة ما بين جسمين غير متصلين في ظاهرهما. تلعب المساحة التي تفصل الجسمين دورًا بطريقة أو بأخرى؛ فهذه المسافة ليست فارغة لكنها مليئة بـ «مجال»، مع أن الماهية المحددة لما يملأ هذا المجال هي مثال حديث لنوعية الأسئلة التي حيرت الفلاسفة القدماء. انبثقت الفكرة عن نيوتن وبقيت ملامحها الأساسية معنا لمدة ثلاثمائة عام، وقد أثرتها أفكار أينشتاين الثاقبة وطُبقت بطرق لم يتخيلها نيوتن قط. تكمن الفكرة الأساسية في وجود نوع من التوتر في الفضاء «الخاوي» يكشف عن نفسه عن طريق توليد قوة على الأشياء التي يتصادف وجودها بالقرب منه. تُسمى منطقة تأثير هذا التوتر باسم «المجال»، ومجال جاذبية الأرض الممتد في الفضاء هو الذي يشد القافزين بالمظلات إلى الأرض، ومجال جاذبية الشمس الذي يحفظ كوكب الأرض في مداره السنوي.

من هنا تبدأ إجابة السؤال الذي ألهمني أساسًا في التبلور. فإذا أزلنا كل الأجسام إلا جسمًا واحدًا فستولد كتلته مجال جاذبية ينتشر عبر الفضاء. يعني هذا أنه يمكن أن نعتبر منطقة ما من الفضاء خالية من كل الأجسام المادية، لكنها لن تكون فارغة لو وجد جسم واحد آخر فقط في مكان ما في الفضاء؛ فمجال الجاذبية الصادر من الجسم البعيد سوف يملأ جميع أرجاء المنطقة «الفارغة» الأخرى. (سنرى في الفصل السادس أنه حتى هذا الجسم الوحيد من الممكن أن يكون وجوده غير ضروري؛ فطبقًا لنظرية النسبية العامة لأينشتاين تخلق الطاقة في جميع صورها مجالات جاذبية).

الموجات

قد تبدو فكرة وجود مجال كهربائي أو مجال جاذبية نتاجًا لخيال الفلاسفة، لكن حقيقة هذين المجالين باعتبارهما أكثر من مجرد نظام تفسيري لكل من قوة الجاذبية والقوة الكهربائية يمكن تبينها بجلاء في صورة الموجات. حرك عصا من جانب إلى آخر على سطح بركة ساكنة وسوف تنتشر موجة. سببت حركة العصا اضطراب جزيئات الماء، التي ارتطم بعضها ببعض بحيث ارتفعت بعض الجزيئات فوق المستوى العادي ثم عاودت الانخفاض مجددًا بفعل الجاذبية، دافعة بدورها جزيئات مجاورة. تتحرك عبر السطح سلسلة متموجة من قمم وقيعان ذات مستوى شدة آخذ في الاضمحلال. وستبدأ قطعة فلين طافية على مبعدة في التمايل عندما تبلغها إحدى الموجات. لقد نقلت الموجة

الطاقة من العصا إلى قطعة الفلين. يحدث أمر أكثر إثارة عندما تتخلخل فجأة بعض الصخور المتقلقلة في قشرة الكرة الأرضية وتنهار بفعل وزنها. تنتشر موجات الضغط عبر الكوكب وتسبب اهتزاز إبرة مقياس الزلزال، مسجلة بذلك وقوع «زلزال». أيضًا، الأصوات التي نسمعها تصدر عن موجات تتحرك في الهواء؛ إذ تسبب أي حركة مفاجئة تحريك موجة ضغط نحو الخارج، وعندما تصل الموجات إلى آذاننا تحرك غشاء طبلة الأذن مما يؤدي إلى سلسلة من الاستجابات الفسيولوجية التي يسجلها مخنا بوصفها صوتًا.

يوجد وسط ملموس في كل حالة من هذه الحالات، «شيء» يؤدي تكثيفه وتخفيفه، بالإضافة إلى ميله إلى الرجوع لحالة من الاتزان الهادئ، إلى خلق الموجة. ثمة أوجه تشابه وأيضًا أوجه اختلاف عميقة في حالة الموجات الكهرومغناطيسية.

إذا كانت الشحنة الكهربائية ساكنة، فإنها تكون محاطة بمجال كهربائي. أما إذا تسارعت أو اهتزت، فستنتشر «موجة كهرومغناطيسية» عبر الفضاء. وستشرع شحنة كهربائية بعيدة في التحرك عندما تصل إليها الموجة. وكما الحال مع موجة المياه أو الصوت، فإن الموجة الكهرومغناطيسية نقلت الطاقة من المصدر إلى المستقبِل. وثمة مثال شائع على هذا وهو الشحنة المتذبذبة في جهاز إرسال موجات الراديو؛ فهذه الشحنة تولد موجة كهرومغناطيسية تنقل الطاقة إلى الشحنات الموجودة في هوائي الراديو.

ذكرنا الكثير عن أوجه التشابه، أما عن وجه الاختلاف العميق فإنه يتمثل في أن سرعة انتقال موجات الماء تعتمد على المسافة بين القمم والقيعان المتوالية (الطول الموجي)، لكن على وجه النقيض تنتقل جميع الموجات الكهرومغناطيسية بالسرعة عينها؛ سرعة الضوء. يسري هذا دائمًا سواء أكنت تتحرك في اتجاه المصدر أو مبتعدًا عنه. يبدو هذا متناقضًا: فلو أنك تتحرك مبتعدًا عن مصدر الضوء بسرعة تقارب سرعة الضوء، كنت ستتوقع أن الضوء سيلحق بك ببطء فحسب، لكنه في الواقع سيُدركك بسرعة الضوء نفسها. وهذه الظاهرة الغريبة هي التي ستقود أينشتاين إلى نظريته الجديدة الثورية المتعلقة بالزمان والمكان؛ النسبية الخاصة، التي سنتناولها باستفاضة في الفصل الخامس.

الضوء هو شكل من أشكال الإشعاع الكهرومغناطيسي شأنه شأن موجات الراديو، والموجات الميكرونية، والأشعة السينية. يملأ المجالان الكهربائي والمغناطيسي الفضاء، ويمكن استثارتهما إلى موجات كهرومغناطيسية. إن فكرة الموجات الكهرومغناطيسية

هي حقيقة مثبتة، حتى لو لم نتعرف بدقة على ماهية ما توجد «فيه» هذه الذبذبات تحديدًا. تستطيع مجالات الجاذبية أن تولد موجات هي الأخرى، على الأقل من الناحية النظرية. إذن «فيمَ» توجد موجات الجاذبية هذه؟ وفق النظرية هي تموجات في الزمكان نفسه. ما الزمكان إذن؟ هل هو شيء يبقى حينما يزول كل ما سواه؟ للإجابة عن هذا السؤال لا مناص من البدء بإسحاق نيوتن.

الفصل الثالث

الفضاء

الخلق

منذ سنوات عديدة، عندما كنت لا أزال مبتدئًا في مجال تبسيط العلوم، طُلب مني أن أقنع أحد الأساقفة الأنجليكانيين، الذي كان ضليعًا في أحداث الخلق المذكورة في سفر التكوين، بأن الكون ظهر قبل ١٤ مليار سنة بفعل «انفجار عظيم». سألني الأسقف: «أخبرني: ألم تعد نظرية الحالة الثابتة مقبولة؟» وكانت فرضية الحالة الثابتة تقضي بأن المادة تظهر على الدوام، وتنص ضمنيًّا على أن الكون ليس له بداية أو نهاية. مع أن هذه الفرضية تحاشت التناقضات المنطقية العظيمة بشأن ما كان عليه الوضع قبل خلق الكون، فإنها تناقضت أيضًا مع علم الفلك المبني على الرصد الدقيق ومن ثم فقدت مصداقيتها. شرحت له هذا لكنني اندهشت من ردة فعله. فقد بدا أن الأسقف تحرر من ثقل كبير: فقد تأكدت له مفاهيم سفر التكوين، كل ما هنالك أن المسألة تتعلق بمقاييس الزمن.

في حين أن الأسقف تقبل الأدلة، مثلما يفعل معظم العقلاء، فإن «الأنصار المتزمتين للمدرسة الخلقوية» يجادلون بشأن المقياس الزمني. حين كنت طالبًا التقيت لأول مرة بشخص يؤمن إيمانًا حارًّا وجادًّا بفكرة خلق الكون منذ ٦ آلاف عام. شرحت له فكرة اختلاف الوضع الظاهري؛ كيف عندما ننتقل من جانب إلى آخر تبدو الأشياء القريبة وكأنها تتحرك بالنسبة لتلك البعيدة، وأن دورة الأرض السنوية حول الشمس تجعلها تتحرك «جيئة وذهابًا» حتى إننا نرى اختلاف الوضع الظاهري في النجوم، وهو ما يؤكد أنها تقع على بعد سنوات ضوئية. حتى دون الخوض في المقاييس الزمنية الأخرى المتعددة، مثل النشاط الإشعاعي الطبيعي للصخور الذي يحدد عمر الأرض بنحو خمسة

مليارات عام، فإن الأدلة القائمة أمام أعيننا تكشف حرفيًّا عن كون يتجاوز عمره الستة آلاف عام بكثير.

وافقني هذا الشخص الرأي، لكنه راح يؤكد أن ما حدث قبل ستة آلاف عام أن عملًا إلهيًّا خلق كونًا مكتمل النمو ذا ذاكرة مدمجة في بنيته الأساسية: فاليورانيوم بنظائره المختلفة ضُبط بحيث يبدو أن عمره خمسة مليارات عام، وأشعة الضوء خُلقت أثناء رحلة الخلق بحيث تبدو آتية من المجرات البعيدة.

إن محاولة فهم الكون صعبة بدرجة كبيرة لا تحتمل معها إضافة المزيد من الأسئلة مثل: إذا كان الكون قد خُلق قبل ستة آلاف عام، فلماذا صُنع بخصائص توحي أن عمره ١٤ مليار سنة؟ لماذا لم يبدأ برنامج الخلق منذ ١٤ مليار عام ثم تُرك الكون ليتطور؟ ماذا حدث قبل عملية «ضبط تاريخ الكون ليبدو أبعد مما هو عليه فعلًا»؟ أم أن الكون قد خُلق بالفعل منذ لحظة فحسب وكل منا لديه ذاكرة محفورة عن ماضينا وعن ماضي الكون الظاهري؟ لا تتناسب مثل هذه الأسئلة مع هذا الكتاب، وأيًّا كان ما تعتقد في صحته، فلا يزال هناك سؤال يطرح نفسه بشأن ما كان عليه الموقف قبل الخلق مباشرة. أو كما سألني أحدهم ذات مرة بعد حديث مبسط: «لماذا لم يحدث «الانفجار العظيم» في وقت أقرب؟»

أزعجت فكرة الخلق من العدم المفكرين منذ فجر التاريخ. وقد ناقش الفلاسفة القدماء هذه الأحجية في إطار قوانين المنطق، أما اليوم فلدينا المنهج العلمي؛ إذ يمكن للتجربة أن تختبر الأفكار وتميز بينها. ومع أن العلم لا يستطيع أن يخبرنا بما حدث قبل «الانفجار العظيم» أو حتى تحديد ما إذا كان لمثل هذا السؤال معنى من الأساس (إذا كان الزمن نفسه قد خُلق لحظة الانفجار العظيم، فما المقصود بـ «قبل» إذن؟) فإنه يرجح فعليًّا وقوع مثل ذلك الحدث.

منذ أن اكتشف إدوين هابل أن مجرات النجوم تتباعد بعضها عن بعض، صار معروفًا أن الكون يتمدد. أعد تشغيل المشهد إلى الوراء وستجد أنه منذ قرابة أربعة عشر مليار سنة تكتلت المجرات بعضها فوق بعض في نقطة فريدة، انفجرت محدثة ما نطلق عليه اسم «الانفجار العظيم». مثل هذه الأفكار يقبلها الآن الجماهير في المحاضرات المبسطة، لكن ما يثير عجبي هو نطاق بعض الأسئلة التي يطرحونها وعمقها، وإليكم مجموعة منتقاة منها: إن كان الكون يتمدد، فما الذي يحتوي تمدده؟ هل المجرات تتمدد؟ هل الذرات تتمدد؟ وعندما يُجاب عليهم بالنفي، يسألون إذن ما الشيء الذي

يتمدد فعليًّا؟ إذا كانت الإجابة «الفضاء»، عندئذ يسألون، وما هذا الفضاء؟ هل الفضاء يوجد بمعزل عن الأشياء، بمعنى أنه سوف يبقى حتى لو أزلت كل أجزاء المادة، أم هل سيزول الفضاء أيضًا بزوال المادة؟

للإجابة عن هذه الأسئلة لا بد أن نستهل نقاشنا بتعريف ما الفضاء فعليًّا. سوف يأخذنا هذا في جولة تبدأ من إسحاق نيوتن والكون الديناميكي في القرن السابع عشر ومنها إلى الأفكار الثاقبة المميزة حول الكهرباء والمغناطيسية لفاراداي وماكسويل في القرن التاسع عشر التي قادت إلى فكرة الزمكان التي خرج بها أينشتاين في القرن العشرين.

نيوتن

يرجع فضل إرساء الأسس الكلاسيكية للفيزياء، التي بينت كيف أن التأثير المتبادل لجسم ما على آخر يؤدي إلى تغيرات في حركتيهما، إلى إسحاق نيوتن في القرن السابع عشر. للوهلة الأولى تبدو قوانين الحركة التي وضعها «بديهية» وبسيطة على نحو خادع. أولًا: يظل الجسم المادي ساكنًا أو يستمر في الحركة بسرعة ثابتة ما لم يؤثر عليه مؤثر خارجي؛ «قوة ما». يُعرف هذا القانون باسم «قانون القصور الذاتي»؛ بمعنى أن الأجسام «كسولة» ولا ترغب في تغيير حركتها. ويتطلب تغيير سرعة الأجسام الاستعانة ببعض المحفزات الخارجية؛ أي قوة خارجية. وكلما كانت القوة أكبر زادت عجلة تحركها. برهنت التجربة على أنك إذا استخدمت قوة الدفع نفسها مع كرة تنس وقطعة من الرصاص لهما نفس الحجم، فإن كرة التنس ستتحرك على نحو أسرع من قطعة الرصاص: أقر نيوتن أن العجلة النسبية للجسمين لكل وحدة قوة تعد مقياسًا لقصورهما الذاتي المتأصل، أو «الكتلة». غالبًا ما يُشار إلى هذا بقانون نيوتن الثاني للحركة، وإلى قانون القصور الذاتي بقانون نيوتن الأول. في واقع الأمر نحن نرى أن القانون الثاني يضم القانون الأول بوصفه حالة خاصة؛ فإذا تلاشت القوة تتلاشى معها العجلة ويستمر الجسم في طريقه دون معيق.

يلتقي كل طالب ميكانيكا بهذه القوانين التي تبدو بديهية. لا شك في أن تطبيقها يمكننا من إرسال مركبة فضائية إلى كوكب المشتري، وباستخدام المقدار الصحيح من القوة في الوقت المناسب، كما يحدد نيوتن، تصل المركبة إلى وجهتها بالفعل. سيسافر رواد الفضاء إلى مواقع غريبة كي يشهدوا جمال كسوف الشمس الكلي، وتعتمد خطط

سفرهم على اليقين بأن توقعات قوانين نيوتن صحيحة بشأن الموقع المضبوط للنطاق البالغ عرضه ١٠٠ كيلومتر على كوكب الأرض الذي سيحجب فيه القمر الشمس تمامًا. لا شك في أن أفكار نيوتن الثاقبة العبقرية صحيحة من الناحية العملية، غير أنه حالما نبدأ في فحصها بمزيد من الدقة، فإنها تثير بعض الأسئلة بشأن طبيعة الفراغ.

تعني حركة الجسيم أن موضعه في لحظة معينة يختلف عن موضعه في لحظة أخرى. دعونا لا نكترث بما تعنيه «اللحظة» أو الزمن هنا، لأننا على وشك مجابهة ما يكفي من المشكلات على كل حال. ما الذي يحدد الموضع؟ الإجابة الطبيعية والمنطقية لهذا السؤال هي «أن الموضع يتحدد بالنسبة لي». بصفة عامة، لا يمكن تحديد موضع أحد الجسيمات أو حركته إلا نسبةً إلى إطار مرجعي معين.

تخيل نيوتن زمانًا ومكانًا مطلقين؛ شبكة استعارية من قضبان قياس غير مرئية تحدد الاتجاهات إلى الأعلى والأسفل، واليمين واليسار، والأمام والخلف، وهي أبعاد المكان الثلاثة. تحركت الأجسام الساكنة أو التي في حالة «حركة منتظمة» (أي غير المتسارعة) طبقًا لقوانين الحركة التي وضعها. وهذه الشبكة كونت التصور الذهني لما عُرف بـ «إطار القصور الذاتي».

يمتد المبدأ لما هو أكثر من ذلك؛ فأي جسم يتحرك بسرعة ثابتة داخل إطار القصور الذاتي هذا سيحدد هو نفسه إطارًا للقصور الذاتي. فنحن نتحرك، وننقل معنا شبكة القضبان التخيلية الخاصة بنا. افترض أنني بداخل سيارة تتحرك بسرعة ثابتة قدرها ١٠٠ ميل في الساعة في طريق مستقيم. داخل إطار القصور الخاص بالسيارة يكون موضعي وأنا جالس بجوار السائق على نفس البعد من مقدمة السيارة دائمًا. لكن داخل إطار القصور الخاص بكاميرا مراقبة السرعة المثبتة على جانب الطريق يتغير موضعي؛ ففي ظرف ساعة سأكون على بعد ١٠٠ ميل بالنسبة للكاميرا، وعليه سوف تسجل الكاميرا هذه الواقعة من منظورها وتصدر مخالفة سرعة.

ليست كل الأطر أطر قصور ذاتي. لتوضيح الفكرة؛ قم بلفة دائرية داخل الغرفة. كي تفعل هذا ستغير اتجاهك؛ ففي لحظة تتجه شمالًا وفي أخرى نحو الشرق. أيضًا ستغير سرعتك؛ قد تكون سرعتك نفسها ثابتة لكن اتجاهها سيتغير مع التفافك. يخبرنا نيوتن أن التغير في السرعة ينتج عن تأثير قوة ما؛ في هذه الحالة ستتولد القوة عن الاحتكاك بين قدميك والأرضية، وعليه لا ضير في هذا. والآن كرر التمرين وثبت نظرك طوال الوقت على نقطة ثابتة، وليكن أحد المقاعد مثلًا. سترى أن المقعد، من منظورك،

يدور هو الآخر. ما القوة التي تؤثر فيه؟ الجاذبية تجذبه لأسفل وتوازنها مقاومة الأرضية، لذا يظل المقعد ساكنًا في الاتجاه من أعلى لأسفل. مرة أخرى، لا ضير في هذا. ومع أنه لم تؤثر فيه أي قوة على المستوى الأفقي، فقد بدا أنه يدور. تسلط هذه الأحجية الضوء على خاصية هامة في قوانين نيوتن للحركة، تلك الخاصية التي يغفلها الطلبة باستمرار: أن هذه القوانين تنطبق داخل «أطر القصور الذاتي»؛ الأطر التي لا تؤثر فيها أي قوة عليك. أثناء سيرك حول الغرفة كانت قوى الاحتكاك في قدميك هي التي تدفعك، وعليه لم تكن داخل إطار قصور ذاتي. إن الحركة الدائرية الظاهرية للمقعد مقارنة بك لا تخرق أي قانون؛ فالمقعد لم يدر داخل إطار قصور ذاتي.

ما إطار القصور الذاتي إذن؟ الإجابة: هو الإطار الذي لا تؤثر فيه أي قوة صافية عليَّ. وكيف لي أن أعرف أنه لا توجد قوى صافية؟ الإجابة: عندما أكون في حالة سكون أو في حالة حركة منتظمة داخل إطار قصور ذاتي. ثمة مفارقة منطقية هنا؛ فلأننا أسرى مجال جاذبية الأرض، وخاضعون لقوتها الجاذبة، فإننا لسنا داخل إطار قصور ذاتي، حتى عندما نكون في حالة سكون على سطح الأرض. والأدهى من هذا أننا ندور حول الشمس خاضعين لجاذبيتها الجامحة. تعد فكرة إطار القصور الذاتي فكرة مضللة من الناحية العملية. غير أننا نفهمها على نحو إجمالي بوصفها تقريبًا لنموذج مثالي، وهو ما يمكننا من إجراء حسابات صحيحة والخروج بتوقعات دقيقة تناسب أغراضنا العملية.

كل شيء سيكون على ما يرام إذا تخيلنا، كما فعل نيوتن، أن هناك مجموعة ثابتة من المحاور في المكان تحدد إطار القصور الذاتي المطلق. قامت فلسفة نيوتن للميكانيكا على أن أي إطارين من أطر القصور الذاتي تتحرك شبكتاهما بالنسبة لإحداهما الأخرى بسرعة ثابتة (يمكن أن تكون صفرًا) في خط مستقيم دون دوران. تظهر الساعتان الموجودتان في الإطارين نفس الوقت أو على أكثر تقدير تختلف إحداهما عن الأخرى بمقدار ثابت غير متغير. ومن ثم، تظهر كل من ساعة بيج بين في لندن وساعة جراند سنترال ستيشن في نيويورك، والساكنتان كلٌّ في مكانها، بفارق في التوقيت قدره خمس ساعات بسبب اصطلاح المناطق الزمنية المتعارف عليه، لكن الفواصل الزمنية ستكون ثابتة لكل منهما: فالفترة ما بين ١٢:٠٠ و١٢:٢٠ مساءً في لندن تساوي الفترة ما بين ٧:٠٠ و٧:٢٠ صباحًا في نيويورك. وإذا وقع حدثان بالتزامن طبقًا لإحدى الساعتين داخل إطار القصور الذاتي الخاص بها، فإنهما سيقعان في الإطار الآخر أيضًا. وعليه، يكون الزمن عالميًّا، ويمكن أن يستخدمه الجميع، أيًّا كانت حالتهم الحركية.

أتحرك أنا وأنت، والأرض، والقمر، وكل الكواكب داخل هذه المصفوفة دون تغييرها بأي شكل من الأشكال. فالمصفوفة أبدية وغير متغيرة. يسير الزمن بطريقة مشابهة. فصوت التكتكة الصادر عن البندول الكوني لنيوتن يقيس انقضاء الزمن باعتباره تدفقًا منتظمًا، وتواصل الأجسام الموجودة في الكون حركتها.

مفاهيم المكان والحركة

عرَّف أرسطو المكان بالأجسام التي يحويها. وقد اعتبر، هو وتلميذه ثيوفراستوس، أن الأجسام حقيقية لكن المكان ليس كذلك؛ فالأجسام الساكنة تحدد المكان بنسبة بعضها إلى بعض، لكن إذا أزلت الأجسام، فإنك إذن أزلت المكان بالمثل طبقًا لتعريف أرسطو. يعني هذا التعريف ضمنًا أيضًا أنه يستحيل أن يوجد شيء اسمه الفراغ؛ لأن الوعاء يزول بإزالة المادة كلها؛ فلا يمكن الخلاص من أحدهما دون الخلاص من الآخر معه. وعرف ستراتو، وهو تلميذ آخر من تلاميذه، المكان على أنه «وعاء كل الأجسام». وأكد ستراتو أن الأجسام تتحرك في الخلاء، وأن الوعاء يوجد في جميع الأحوال سواء وجد فيه شيء أم لا. وإذا لم يوجد شيء فيه، فهو فراغ إذن.

أدرك بيير جاسندي أن تجارب تورشيللي قضت بأن الفراغ يمكن أن يوجد، وأنه يمكن للإنسان أن يصنعه. وقد نظر إلى المكان بنظرة سلبية؛ فهو يسمح للأشياء أن تنتقل خلاله دون أن يسمح «بالتأثر بها أو التأثير فيها».

يشبه تصور إسحاق نيوتن عن المكان هذا التصور؛ إذ تصور مكانًا مطلقًا، مساحة توجد فيها الجسيمات والأجسام والكواكب وتتحرك. وفي منظوره أيضًا يوجد المكان كما لو كان مصفوفة غير مرئية من ورق الرسم البياني يستحيل التأثير فيها. تتحرك الأجسام خلال هذه المصفوفة الشبكية دون أن تغيرها، ومن ثم كان لوجودها دلالة مطلقة حتى في غياب الأجسام، وبموجب هذا، فإن المكان «الفارغ» هو ما يتبقى عند إزالة جميع الأجسام المادية. رأى نيوتن أن غياب المادة يعني ضمنًا غياب قوة الجاذبية أيضًا، وهو ما لا يخلف شيئًا خلا إطار القصور الذاتي الخالص للفضاء المطلق. وهذا على النقيض من الأماكن النسبية التي تحددها الشبكة المرتبطة بكل جسيم متحرك، لأنها تقتضي وجود أجسام لتحدد حركتها النسبية ومن ثم مصفوفاتها النسبية المتناسقة. ما كان أينشتاين ليتبنى أيًّا من وجهات النظر هذه؛ فقد تملكته شكوك خطيرة فيما يتعلق بحقيقة المكان حتى عندما توجد أجسام على مقربة؛ فالزمان والمكان نفسهما يمتدان

ويُعدلان بفعل حركة الأشياء. وقد اعتبر أن مفهوم المكان الفارغ مفهوم متناقض في حد ذاته.

في المكان المطلق لنيوتن، تخيل وقوع مجموعة من الأحداث مثل أن يتقاذف أحدهم ثلاث كرات. والآن تخيل أن كل شيء آخر يتحرك حركة منتظمة نسبة إلى هذا المكان المطلق. يصر نيوتن على أنه لن يتغير بالموقف شيء سوى وجود مصفوفة المكان في حالة حركة منتظمة؛ فنفس القوانين والخبرات تسري على هذا الموقف. تتحرك الأرض حول الشمس بسرعة قدرها نحو ٢٠ كيلومترًا في الثانية، إذن في الفترة ما بين شهري أبريل وأكتوبر، عندما نكون على جانبين متقابلين من الدائرة ونتحرك في اتجاهين متضادين، فإن سرعتنا تتغير بمعدل ٤٠ كيلومترًا في كل ثانية، غير أن مهارات لعب الكرة هي نفسها.

على الرغم من أنه لا يوجد مقياس مطلق للسرعة — فالحركات النسبية هي وحدها التي تُحدَّد بوضوح — يختلف الأمر للعجلة: إذ إن مقدارها كما يقاس في كل أطر القصور الذاتي ثابت لا يتغير. يتباهى إعلان تليفزيون بأن سيارة السباق يمكنها أن تنتقل من سرعة الصفر إلى سرعة ٦٠ ميلًا في الساعة في ثلاث ثوانٍ. لا حاجة هنا لوضع أي شرط مثل «من منظور المشاة الساكنين في الشارع فقط»، لأن العجلة ذاتها سيدركها راكبو الدرجات المرعوبون الذين يسيرون بسرعة ثابتة قدرها ١٥ ميلًا في الساعة بالمثل. بيد أنه عندما تظهر مثل هذه الإعلانات في التليفزيون التعليمي، ربما يجدر أن يُذكر شرط على غرار «من منظور المراقبين داخل أطر القصور الذاتي الخاصة بهم». قد يحاج البعض بأن الركاب الموجودين داخل السيارة يكونون دائمًا في حالة سكون نسبة إلى السيارة والسيارة تسرع بهم. غير أنهم سيشعرون بانزعاج ملحوظ عندما تُدفع ظهورهم بقوة إلى مقاعدهم كما لو كان بفعل قوة غير مرئية. وعندما تنعطف هذه السيارة في منعطف حاد، سيشعر الركاب مرة أخرى بأنفسهم يُدفعون بقوة، هذه المرة يُدفعون إلى الجانب بفعل ما نطلق عليه «القوة الطاردة المركزية». في كلتا الحالتين، لا يكون الركاب داخل أطر من القصور الذاتي.

كي نوضح فكرة نيوتن حول الفضاء المطلق، وكيف بدأ أينشتاين يتشكك فيها، تخيل نفسك مسافرًا على متن طائرة متجهة من لندن إلى نيويورك مثلًا. أنت تجلس في الصف الأمامي، وبعد الإقلاع مباشرة تنطفئ علامات التنبيه بربط حزام الأمان مع وصول الطائرة إلى الارتفاع الذي تحلق عنده بثبات بسرعة ٥٠٠ ميل في الساعة دون أي

مطبات هوائية لمدة ثماني ساعات. أنت ثابت في مكانك على الطائرة في حين تؤكد أسرتك على الأرض أنك سافرت ٤ آلاف ميل؛ يبين هذا أنه لا معنى للمكان المطلق. بعد انقضاء الثماني ساعات، تؤكد أسرتك أنك تحركت بسرعة ٥٠٠ ميل في الساعة في حين تقول أنت إنك لم تتحرك من موضعك على الإطلاق؛ يؤكد هذا أنه لا معنى للسرعة الثابتة المطلقة. وإذا قررت أن تمضي وقتك في تقاذف الكرات وأنت جالس في مقعدك، على افتراض أن هذا السلوك الغريب لن يلفت أنظار أفراد طاقم الطائرة المتوترين، فإنك ستشعر بنفس الشعور وتتحلى بنفس المهارة وكأنك تقوم بالأمر عينه وأنت في منزلك. إما إذا اصطدمت الطائرة بمطب هوائي، أو قذفت أنت الكرات أثناء الإقلاع، فستتدافع الكرات في مسارات جديدة وسيختلف الموقف كله تمامًا.

ومع ذلك، ستتفق أنت وأسرتك على أنك أثناء عملية الإقلاع التي ربما استمرت لنصف دقيقة، انطلقت بسرعة على المستوى الأفقي ثم ارتقيت على نحو متسارع نحو السماء. ربما شاهد أفراد عائلتك عملية الإقلاع، في حين شعرت أنت بوضوح بعملية الإقلاع على شكل قوة تؤثر فيك في البداية كضغط في ظهرك عندما تسرع الطائرة عبر الممر ثم في المقعد عندما تنطلق نحو السماء. يمكن أن تستنتج من كمية الضغط الذي تشعر به، على الأقل بالتقريب، مدى العجلة التي تتحرك بها.

بالنسبة لأينشتاين، الذي لم يعرف شيئًا عن الطائرات النفاثة في عام ١٩٠٥ لكن كان بمقدوره تخيل الوجود في مصعد يسقط سقوطًا حرًّا، سيكون للعلاقة بين القوة والعجلة أهمية كبيرة في تصوره لكل من الزمان والمكان.

أسهل طريقة لبيان تأثير العجلة دون الاضطرار إلى الانطلاق بسرعة كبيرة هي الدوامة، فالدوران يعد أحد الأمثلة على العجلة.

تخيل أنك في غرفة صغيرة بلا نوافذ وأن الغرفة تدور حول نفسها. مع أنك معزول عن العالم المحيط، فإنه لا يزال بإمكانك أن تعرف أنك تدور حول نفسك، وذلك نسبةً إلى … شيء ما. بطريقة أو بأخرى تملأ قضبان المساحة في مصفوفة نيوتن — الفضاء الذي يحدد المكان — غرفتك الصغيرة. ليس بمقدورك أن ترى العجلة؛ فهي تحدث في سكون ويستحيل سماعها، وليس لها رائحة، وإذا مددت ذارعك فلا يوجد أية أشكال مادية تثبت لك أنها موجودة. لكن استدر ولفَّ ولسوف تشعر بها تخترق كيانك. ونحن نطلق على التأثير الذي تخلفه العجلة مع تغير اتجاهك اسم «القوة الطاردة المركزية». وعليه، هل هذا المكان المطلق حقيقي بطريقة ما؟ هل يظل باقيًا حتى عندما تُزال كل صور المادة؟

اقترح إرنست ماش، الذي جاء بعد نيوتن بمائتي عام، أن «النجوم الثابتة» تحدد المكان. نحن نعيش في دوامة لأن الأرض تدور حول نفسها مرة كل أربع وعشرين ساعة. ومع أنك تشعر بجميع حواسك حين تدور في دوامة، فإنك ستحتاج إلى أجهزة حساسة حتى ترصد دوران الأرض حول نفسها. وحتى في غياب هذه الأجهزة، ستكشف صورة لسماء الليل ينتصفها النجم القطبي، والملتقطة عن طريق التعريض طويل المدى، عن أن النجوم تتحرك في دروب دائرية حولنا خلال الليل. إن فكرة أن كل تلك النجوم تتحرك في رقصة دائرية متناسقة، في بعض الحالات يبعد بعضها عنا ملايين السنين الضوئية، هي فكرة غير منطقية ولربما اقتضت أيضًا أن تتحرك النجوم أسرع من سرعة الضوء. إننا نحن من ندور حول أنفسنا على نحو مطلق مقارنة بخلفية النجوم.

يصير هذا أكثر وضوحًا إذا زدنا سرعة الدوران.

اجلس في مقعد دوار ولفَّ حول نفسك. كل شيء حولك، بما فيه النجوم إذا كنت تجلس في الهواء الطلق في ليلة صافية، سوف يدور أيضًا. وما يستغرق أربعًا وعشرين ساعة لمشاهدته من الأرض سيستغرق ثانية واحدة هذه المرة. هل يمكن أن تحرك قوة عضلاتك مجرات بأكملها، بحيث تتحدد سرعة دورانها بما إذا كنت تدفع الأرض بقدمك دفعة خفيفة أم تركلها بقوة؟ قطعًا لا، وأنت أيضًا ليس لديك أدنى شك في أنك أنت الذي تدور وليست النجوم؛ لأنك تشعر بالقوة الطاردة المركزية. تتأثر الأرض بفعل دورانها حول نفسها بالقوة الطاردة المركزية، مع أن تأثيرات هذه القوة ليست ظاهرة بدرجة كبيرة. الأرض كرة منبعجة؛ فقطرها عند خط الاستواء أكبر منه عند الخط الممتد من القطب للقطب، ومن الأمثلة الأخرى على ذلك، تبدل مواسم الطقس وميل الحركة إلى الاتجاه «تلقائيًّا» نحو الشرق، وهذا يعرف بتأثير كوريوليس.

ولعل بندول فوكو هو أفضل وسيلة لإثبات أن النجوم الثابتة تصنع إطارًا يمكن كشف الدوران والعجلة نسبة إليه. في كثير من المتاحف العلمية ستجد بندولًا يتأرجح من أحد الأسقف من الشمال إلى الجنوب على سبيل المثال، ولدى مغادرتك المتحف بعدها بساعات يتأرجح البندول من الشرق إلى الغرب دون أن يتدخل أي شخص ليغير اتجاهه. هذه الظاهرة التي رأيتها في متحف العلوم بلندن كانت أحد الألغاز المذهلة التي أثارت اهتمامي بالعلوم عندما كنت طفلًا. حقيقة هذه الظاهرة أنه لا شيء يدفع البندول حقًّا؛ إذ يظل البندول يتأرجح في الاتجاه عينه نسبة إلى النجوم الثابتة، والأرض هي التي تحركت آخذة معها المتحف وإيانا.

مع أن هذ النظرة إلى النجوم تجعل فكرة الدوران المطلق منطقية، هل يمكن لطفل يركب بكل براءة أرجوحة دوَّارة أن يدرك أن هناك مجرات من النجوم على مسافة بعيدة؟ الأرض قريبة لنا للغاية، حتى إن جاذبيتها تثبت أقدامنا عليها. القمر صغير الحجم لكنه قريب بالدرجة التي تمكنه من التأثير على المد والجزر، في حين أن أقرب نجم إلينا وهو الشمس يبقينا في مدارنا السنوي. أما جاذبية الكواكب الأخرى فهي غاية في الصغر لدرجة تجعلها عديمة التأثير علينا، مهما كان ما يزعمه مؤيدو التنجيم. جاذبية النجوم البعيدة وحتى المجرات المنفردة التي تحوي مليارات النجوم ضعيفة للغاية ولا تؤثر على شئون حياتنا اليومية، مع أن الجاذبية الإجمالية لمجرتنا؛ مجرة درب التبانة، وجاذبية مجرة سحابة ماجلان الكبرى تجعل الأخيرة تدور كالقمر التابع حول مجرتنا. عندما تتضاعف المسافة التي تفصلنا عن أي مجرة يقل تأثير الجاذبية الخاص بها إلى الربع. لكن لو كانت المجرات موزعة على نحو منتظم في أنحاء الفضاء، عندئذ سيقابَل كل تضاعف للمسافة بتضاعف قدره أربع مرات في العدد بحيث يظل إجمالي تأثيراتها الجذبوية ثابتًا تقريبًا حتى أطراف الكون. وهكذا مع أن المدَّ والجزر اليوميين والمواسم السنوية على كوكب الأرض يحكمهما تأثير قوى الجذب الآتية من الشمس والقمر، فإن كل هذا يجري ضمن مجال جاذبية النجوم «الثابتة» البعيدة الأشمل.

هذا هو أقرب مفهوم يمكننا أن نصل إليه بسهولة كي نعرف الشبكة المترية المطلقة للمكان المطلق. إن الدوران نسبة إلى مصفوفة الجاذبية هذه هو ما نشعر به عندما نلف في دوامة، أو ننعطف ونحن نستقل سيارة، أو بصفة عامة عندما نغير سرعتنا. ومع ذلك تنشأ مشكلات؛ إذ إن النجوم الثابتة ليست ثابتة إلى هذه الدرجة، وهذه الصورة تعني أيضًا أن سماء الليل ينبغي بها أن تظل ساطعة كما الحال بالنهار ما دام هناك نجم ما في كل جزء من مجالنا البصري (الأمر الذي يُعرف بمفارقة أولبرز)، وحل هذه المشكلة هو أن الكون يتمدد. من المعروف أن صورة الزمان والمكان التي قدمناها، المبنية على فلسفة إسحاق نيوتن، صورة غير كاملة. ومنذ مطلع القرن العشرين ساد تصور ألبرت أينشتاين الأكثر ثراءً. ولا ترجع أصول هذا التصور إلى الجاذبية، وإنما إلى التأثيرات الكهربائية والمغناطيسية، مع أنه سيتبين أن الجاذبية تقوم فيه بدور رئيسي.

الفصل الرابع

ما الذي يحتوي الموجات؟

المجالات الكهرومغناطيسية والموجات

في المرة القادمة التي تدير فيها مفتاح تشغيل سيارتك ويبث التيار الكهربائي الآتي من البطارية الحياة في المحرك بفعل القوة المغناطيسية، توقف لحظة لتفكر في أن بذور النسبية والنظرة المعاصرة للزمان والمكان تكمن فيما حدث للتو. عندما أجرى مايكل فاراداي تجاربه على الكهرباء والمغناطيسية في أوائل القرن التاسع عشر، لم يتوقع أحد أن هذا سوف يؤدي إلى إعادة تقييم عميقة لنظرة نيوتن للعالم. قام فاراداي باكتشافات عظيمة للغاية، حتى إنه لو كانت جوائز نوبل في القرن التاسع عشر، لفاز بها ست مرات، وكان أعظم اكتشافاته تأثيرًا هو أن المجالين الكهربائي والمغناطيسي متداخلان تداخلًا عميقًا ويؤثر أحدهما في الآخر.

من أمثلة ذلك ما يحدث في محرك سيارتك. على سبيل المثال، إذا حركت مغناطيس فجأة سوف تخلق قوى «كهربائية»، ويُعرف هذا باسم الحث، وهو المبدأ الذي تقوم عليه المولدات الكهربائية. الفكرة هي أن المجالات المغناطيسية المتفاوتة تخلق مجالات كهربائية والعكس صحيح؛ فالتغير المفاجئ في المجالات الكهربائية يخلق مجالات مغناطيسية. تتسبب التيارات الكهربائية المتحركة في مركز الأرض في وجود المجال المغناطيسي للأرض. وهذا التبادل المتواصل بين المجالات الكهربائية والمغناطيسية جزء لا يتجزأ من آلية عمل المحرك الكهربائي.

يمكن خلق المجالات المغناطيسية من خلال التيارات الكهربائية، التي هي بدورها شحنات كهربائية متحركة. كل شيء يسير على ما يرام حتى الآن، على الأقل إلى أن تتساءل «متحركة نسبة إلى ماذا؟» وهو السؤال الذي تكون إجابته المنطقية: «نسبة إليك أنت» داخل إطار قصورك الذاتي (الساكن). لكن تخيل أنك تتحرك الآن على طول

السلك الذي يحمل التيار وبنفس سرعة تدفق الشحنات الكهربائية به. في هذه الحالة ستبدو الشحنات ساكنة بالنسبة إليك. تولد الشحنة الساكنة نسبة إليك، في أحد أطر القصور الذاتي، مجالًا كهربائيًّا، وهكذا ستشعر في هذا الموقف بوجود مجال كهربائي أما فيما سبق فكنت تشعر بوجود مجال مغناطيسي. زِد سرعتك أو قللها ولسوف تبزغ مجالات مغناطيسية على حساب المجالات الكهربائية. ما كان مجالًا مغناطيسيًّا في أحد أطر القصور الذاتي تحول إلى مجال كهربائي في إطار آخر. يعتمد تفسيرك للمجال على أنه كهربائي أو مغناطيس على حركتك أنت.

أكد أينشتاين على أن قوانين الفيزياء يستحيل أن تعتمد على الحركة المنتظمة للمراقب. فما ينطبق على أحد المراقبين في أحد أطر القصور الذاتي لا بد أن ينطبق بالمثل على جميع الموجودين في كل أطر القصور الذاتي مهما كانت حركتهم النسبية. يقودنا هذا بدوره إلى نظرية النسبية، التي سنعرف عنها المزيد في الفصل الخامس. ما قدمته النسبية للمجالين الكهربائي والمغناطيسي هي أنها أظهرت أنهما ليسا مجموعتين منفصلتين مستقلتين من الظواهر، وإنما هما متداخلان تداخلًا عميقًا فيما يُعرف بالمجال الكهرومغناطيسي.

وضع هذا أساس نظرية الظواهر الكهرومغناطيسية التي اكتشفها جيمس كلارك ماكسويل في منتصف القرن التاسع عشر. صاغ ماكسويل اكتشافات فاراداي وجميع الظواهر الكهربائية والمغناطيسية المعروفة في أربعة معادلات فقط. وبعد أن صاغها، عمل على إيجاد حلول لها، وهكذا اكتشف أنها تضم بين ثناياها سيمفونية متكاملة من الظواهر الجديدة.

لفهم ماهية هذه المعادلات وسبب تناغمها، تحتاج أن تفهم أولًا الغرض وراء صياغة معادلات ماكسويل. بينت المعادلات أن المجال الكهربائي أو المغناطيسي المتغير سيولد الرفيق المتمم له؛ فالمجال الكهربائي يولد مجالًا مغناطيسيًّا والعكس صحيح. المجال الكهربائي مجال مُوَجَّه: فهو يتمتع بكل من المقدار والاتجاه. وإذا كان المجال الكهربائي متذبذبًا، كأن يتغير اتجاهه «إلى أعلى» و«إلى أسفل» بالتبادل، عددًا من المرات في الثانية، فإن المجال المغناطيسي الناجم سيتذبذب بنفس المعدل هو الآخر. هذا ما تضمنته معادلاته. ثم وضع ماكسويل حالة المجال المغناطيسي المتذبذب في معادلة أخرى من معادلاته ووجدها تتنبأ بأن هذا سوف يولد مجالًا كهربائيًّا نابضًا. وبإعادة هذا التذبذب الكهربائي إلى المعادلة الأصلية ستجد التسلسل مستمرًّا، من مجال كهربائي إلى

مغناطيسي جيئة وذهابًا. يكون التأثير الناجم أن الخليط الكامل للمجالين الكهربائي والمغناطيسي ينتشر عبر الفضاء على صورة موجة. قدمت قياسات فاراداي عن الظواهر الكهربائية والمغناطيسية البيانات الضرورية التي عندما أُدخلت إلى معادلات ماكسويل مكنته من حساب سرعة الموجات. وجد ماكسويل أن سرعة الموجات تصل إلى ٣٠٠ ألف كيلومتر في الثانية بصرف النظر عن تردد الذبذبات. هذه أيضًا سرعة الضوء، ومن هذا خرج باكتشاف عظيم: أن الضوء موجة كهرومغناطيسية.

يتكون الضوء المرئي، ألوان قوس قزح، من موجات كهرومغناطيسية يتذبذب مجالاها الكهربائي والمغناطيسي مئات ملايين المرات في الثانية الواحدة، فالمسافة بين القمم المتتالية تكون ضيقة للغاية بحيث تصل إلى نحو واحد على مليون من المتر. ويأتي اختلاف الألوان نتيجة لتذبذب الموجات الكهرومغناطيسية بترددات مختلفة. قضت أفكار ماكسويل الثاقبة بأنه لا بد أن يوجد موجات كهرومغناطيسية وراء قوس قزح تسافر بنفس سرعة الضوء، لكن تتذبذب بترددات مختلفة.

كانت الأشعة تحت الحمراء والأشعة فوق البنفسجية معروفة بالفعل، ويشير المقطعان «تحت» و«فوق» إلى تردد ذبذباتهما نسبة إلى الضوء المرئي. أوحت هذه الخيوط للعلماء بالبحث عن أمثلة أخرى. ولَّد هاينريش هرتز بمدينة كارلسروه شرارات كهربائية وأثبت أنها أرسلت موجات كهرومغناطيسية عبر الفضاء دون الحاجة إلى موصلات مادية، ومن هنا جاء اسم «لاسلكي». تعد موجات الراديو البدائية هذه موجات كهرومغناطيسية قريبة لموجات الضوء لكن في جزء مختلف من الطيف. أطلق هرتز اسمه على وحدة التردد بمعنى أن التردد الواحد في الثانية يُطلق عليه واحد هرتز، والألف تردد والمليون تردد في الثانية يطلق عليهما كيلوهرتز وميجاهرتز. وموجات الراديو هي موجات كهرومغناطيسية تتذبذب في مدى يتراوح بين الكيلوهرتز والميجاهرتز.

وكما كان الحال مع الضوء المرئي، الذي يسافر عبر الفراغ، ينطبق الأمر عينه على موجات الراديو وكل ترددات الموجات الكهرومغناطيسية. يمكننا التواصل مع المركبات الفضائية البعيدة بفضل موجات الراديو التي تسافر عبر الفضاء الفارغ كما الحال مع أشعة الضوء المرئية، وبنفس السرعة الكونية البالغة ٣٠٠ ألف كيلومتر في الثانية.

من الآثار الأخرى المترتبة على عمل ماكسويل هو أن الأجسام المشحونة كهربائيًّا والأجسام المغناطيسية التي يفصلها مسافات كبيرة لا يتفاعل بعضها مع بعض مباشرة، وإنما تتفاعل عن طريق مجال كهرومغناطيسي ينتشر من جسم إلى آخر بسرعة الضوء.

حرك شحنة كهربائية عند نقطة ما، ولن تبدأ الشحنة البعيدة في التذبذب بالتوافق مع هذه الشحنة إلا عندما تصلها الموجة الكهرومغناطيسية الناجمة. يختلف هذا اختلافًا جذريًّا عن الصورة الميكانيكية التي رسمها نيوتن والتي يحدث فيها مثل هذا الفعل في اللحظة عينها.

يعتمد استقبال موجات الراديو، وعلم بلورات الأشعة السينية، والرؤية بصفة عامة على قدرة إحدى الموجات الكهرومغناطيسية على أن تمتصها المادة أو تشتتها بعد اجتياز الموجة ما يبدو كالفضاء الفارغ. هنا يكمن السؤال الأساسي بشأن الضوء باعتباره موجة كهرومغناطيسية: ما الوسط الذي يتموج؟ أو كما يُطرح السؤال على نحو أكثر صراحة: «ما الذي يحتوي الموجات؟»

ما الذي يحتوي الموجات؟

اكتشف روبرت هوك في القرن السابع عشر أن الصوت لا يمر عبر الفراغ. بدا هذا منطقيًّا نظرًا لأن حقيقة أن الصوت ما هو إلا ذبذبات من الهواء معروفة منذ زمن الفلاسفة الرواقيين في اليونان القديمة؛ فبإزالة الهواء يزول الصوت أيضًا. تعارض هذا مع الضوء والمغناطيسية؛ لأن المصباح يسطع دون تغير عندما يُرى عبر الفراغ كما لو كان الهواء والمجال المغناطيسي يستمران في التأثير أحدهما على الآخر في الفراغ. إذن، بعدما يزول الهواء، هل يتبقى شيء آخر بإمكانه أن ينقل هذه التأثيرات؟ مقت الإغريق القدامى فكرة الفراغ أيما مقت، ومن هنا بزغت فكرة «الأثير»، والمقصود به «وسط أخف من الهواء» يملأ كل الفضاء حتى بعد إزالة الهواء. آمن إسحاق نيوتن بوجود الأثير مع أنه ليس واضحًا ماذا كان يعني الأثير من وجهة نظره تحديدًا. وسادت أفكار حول الأثير في القرون اللاحقة، إلى أن أطاحت بها في آخر المطاف نظرية النسبية لأينشتاين. هكذا ظهر الأثير، وهكذا اندثر.

كان نيوتن فيلسوفًا متخصصًا في علم الميكانيكا، يفسر الظواهر الطبيعية مثل حركة الجسيمات في المادة، وهو ما قاده في البداية إلى تصور الضوء وكأنه تدفق من الجسيمات أو «الفوتونات» كما نطلق عليها اليوم. رفضت ميكانيكا نيوتن أيضًا فكرة «التفاعل عن بعد». وقد أعزى الظاهرة الإلكتروستاتيكية — التي تحدث مثلًا عندما تنجذب قصاصات الورق إلى قطعة من الزجاج جرى حكها بقطعة قماش — إلى مادة

أثيرية تخرج من الزجاج وتعود بالورق معها. وفي عام ١٦٧٥ كوَّن نظريته عن الضوء، التي تضمنت الأثير الكوني.

غير أنه لم يكن راضيًا، وفي غضون خمس سنوات تخلى عن الاعتقاد بوجود الأثير واستحدث فكرة التجاذب والتنافر بين جسيمات المادة. وبعدها بخمس وثلاثين سنة أصدر الطبعة الثانية من كتابه «البصريات» وصرح فيها مرة أخرى عن قبوله لوجود أثير، لكن ذلك الأثير الذي يسمح بالتفاعل عن بعد بفعل التنافر بين الجسيمات التي تشكل الأثير.

في القرن الثامن عشر رفض عالم الرياضيات والفيزياء السويسري ليونهارت أويلر النظرية الجسيمية لنيوتن حول الضوء وطرح تفسيره الخاص للظواهر البصرية باعتبارها ذبذبات في الأثير المائع. تغير كل شيء مع مطلع القرن التاسع عشر عندما أثبت الفيزيائي الإنجليزي توماس يونج أن الضوء يتألف من موجات. كان اهتمامه منصبًّا بالأساس على الرؤية. كطالب طب، كان قد اكتشف كيف يتغير شكل عدسة العين مع تركيزها على أشياء تقع على مسافات مختلفة. وقد اكتشف أسباب الأستجماتزم في عام ١٨٠١ ثم انصرف إلى الاهتمام بطبيعة الضوء. ومن هنا اكتشف تأثيرات التداخل، حيث يتسبب الضوء المار عبر ثقبين إبريين في إنتاج سلسلة من الحزم المظلمة والمضيئة بالتناوب. تشابه هذا مع الطريقة التي تمتزج بها موجات المياه صانعة قمم كبيرة عندما تتزامن قمتان أو تستوي عندما تتلاقى قمة وقاع. كان من شأن الامتزاج بين القمم والقيعان في موجات الضوء أن يفسر هذه الظاهرة طبيعيًّا، بل في الواقع، كانت فكرة أن موجتين من الضوء يمكن أن تصنعا ظلامًا فكرة مدهشة وقد أُخذ تفسيرها في ضوء الموجات كدليل قاطع على الطبيعة الموجية للضوء. (أصبح عمل يونج مقبولًا بعدما أعاد تقديمه الفيزيائي الفرنسي أوجستان فرينل، إلا في إنجلترا حيث كان يُنظر إلى معارضة نظريات نيوتن نظرة سلبية).

أدى الاهتمام بطبيعة الضوء والكهرباء في القرن التاسع عشر إلى انتعاش الأفكار القديمة المتعلقة بالأثير باعتباره الوسط الذي ينقل موجات الضوء كما ينقل الهواء الصوت. وبحسب علوم القرن التاسع عشر افتُرض أن الأثير عديم الوزن، شفاف، عديم الاحتكاك، ويستحيل الكشف عنه عمليًّا باستخدام أية وسيلة فيزيائية أو عملية كيميائية. إنه يتخلل كل شيء وكل مكان، ويُفترض أنه شكل من أشكال المواد الصلبة المرنة، مثل الفولاذ، ومع ذلك فهو يتمتع بقدرة مدهشة على السماح للكواكب بالنفاذ عبره كما لو لم

يكن موجودًا. انشغلت كثير من علوم القرن التاسع عشر بمحاولة الكشف عن كنه هذا الشيء الغامض.

حلَّت فكرة الأثير معضلة انتقال الموجات عبر الفراغ، غير أنها لم تفسر سبب تغيير الضوء لسلوكه عندما يخترق وسطًا شفافًا ليس بفراغ قطعًا؛ وَسَطًا مثل الماء والزجاج. فسرعة الضوء في الماء أقل من سرعته في الفراغ، وبعض المواد الشفافة للضوء المسلط عليها مباشرة من الممكن أن تصير معتمة، بحيث تشتته، وهي الظاهرة التي يُستفاد منها في بعض النظارات الشمسية المستقطبة. جرى تفسير كل هذه الظواهر طبيعيًّا عقب اقتراح ماكسويل بأن الضوء موجة من المجالين الكهربائي والمغناطيسي.

كان من المفترض أن الأثير هو الوسط الذي يتذبذب فيه الضوء. وكان هذا الافتراض يقضي بأن الأثير ساكن في كل أنحاء الكون، مما يفسر حالة السكون المطلقة التي نادى بها نيوتن. وبحلول عام ١٨٨٧ بات جليًّا أن الضوء موجة من المجالين الكهربائي والمغناطيسي المتذبذبين. في حالة الصوت تتحرك الموجة باتجاه الحركة؛ تختلف الموجة الكهرومغناطيسية في أن الذبذبات تكون متعامدة على الحركة. ومن ثم افتُرض أن القوانين الكهرومغناطيسية وقوانين الضوء تنطبق على الحالة المثالية المرتبطة بالأثير الساكن.

مشكلة الأثير

قدم حساب ماكسويل لسرعة الموجات الكهرومغناطيسية طريقة لحساب سرعتنا نسبةً إلى الأثير الذي يحدد الفضاء المطلق. للتوضيح، فكر في الموجات المائية؛ ألق حجرًا في الماء وستنتشر الموجات. تبلغ سرعة الموجة نحو متر واحد في الثانية. هذه السرعة إحدى خصائص الماء؛ فهي لا تعتمد على سرعة المصدر؛ بمعنى أنه إذا أُلقي الحجر من قارب مستقر، فإن الموجة تنتشر بسرعة متر واحد في الثانية، وإذا أُلقي من زورق بخاري سريع فستنتشر الموجة أيضًا بسرعة متر واحد في الثانية. إذا كنت على متن قارب ساكن في الماء، فسترى الموجة تمر بك بسرعة متر واحد في الثانية، أما إذا كنت تتجه نحو الموجة بسرعة ١٠ أمتار في الثانية فإن الموجات سوف تقترب منك بسرعة ١١ مترًا في الثانية، في حين أنك إذا كنت متجهًا في الاتجاه المعاكس بالسرعة ذاتها نسبة إلى الماء، فستلحق بك الموجات بسرعة ٩ أمتار في الثانية. يمكنك أن تحدد سرعتك المطلقة نسبة إلى الماء بهذه الطريقة.

وكما الحال مع القارب في الماء، يكون أيضًا حال كوكب الأرض في الأثير. تتحرك الموجات الكهرومغناطيسية بسرعة ٣٠٠ ألف كيلومتر في الثانية، وهذه إحدى خصائص الفضاء ولا تعتمد على سرعة المصدر، كما الحال في مثال الماء. وبالمثل، إذا كنت ستتحرك عبر الأثير، فبقياس سرعة موجات الضوء، تستطيع تحديد سرعتك نسبة إلى ذلك الوسط. كل ما يتطلبه الأمر قياس سرعة الضوء عبر الأثير في مختلف الاتجاهات ومن خلال هذا يمكن تحديد في أي إطار بالتحديد كانت السرعة التي حسبها ماكسويل. سيكون هذا الإطار وقتها هو الإطار المطلق للكون؛ حالة السكون المطلق نسبة إلى الأثير. غير أن الأمور لم تسر كالمتوقع.

كان من المفترض أن تنطبق قوانين نيوتن للحركة (فلم يكن هناك بديل آخر وقتها!) وعليه إذا تحركت الأرض نسبة إلى الأثير كان لا بد عندئذ من رصد حركتها. على سبيل المثال، إذا كانت الأرض تتحرك عبر الأثير، فإن الضوء المتحرك في نفس الاتجاه كانت ستزيد سرعته بسبب سرعة الأرض، في حين أن الضوء المتحرك في اتجاه معاكس ما كان ليحظى بهذا الدعم الإضافي. ولن تكون سرعة الضوء ٣٠٠ ألف كيلومتر في الثانية، كما حُسبت في نظرية ماكسويل، إلا حين تكون الأرض في حالة سكون نسبة إلى الأثير.

تبعد الأرض نحو ١٥٠ مليون كيلومتر عن الشمس وتتمم دورتها التي تبلغ نحو مليار كيلومتر في سنة واحدة، أي ٣٠ مليون ثانية، مما يعني أن الأرض تتحرك نحو ٣٠ كيلومترًا كل ثانية. وطبقًا لحسابات ماكسويل، يتحرك الضوء بسرعة ٣٠٠ ألف كيلومتر في الثانية «نسبة إلى الأثير»، وعليه ستغير حركة الأرض — عندما تكون الأرض عند نقطتين متقابلتين تمامًا في مدارها — سرعتها مقارنة بالضوء بنحو جزء في كل ٥ آلاف جزء.

تطلب رصد هذه التأثيرات الطفيفة الناجمة عن حركة الأرض بعض البراعة. قام ألبرت ميكلسون بمحاولة أولى في عام ١٨٨١، لكن لم تتحقق الدقة المطلوبة إلا في عام ١٨٨٧ عندما تعاون مع إدوارد مورلي. ولم يتوصلا إلى ذلك عن طريق مقارنة قياسات تفصلها ستة أشهر، وإنما في تجربة واحدة في المعمل شطرا فيها شعاعًا من الضوء إلى شعاعين وأطلقاهما في اتجاهين مختلفين، ثم أعاداهما أخيرًا إلى نقطة الانطلاق عن طريق مرآة. تحرك الشعاعان بشكل معاكس أحدهما للآخر، وعليه إذا حدث وكان أحدهما موازيًا لاتجاه حركة الأرض، سيكون الآخر معاكسًا لاتجاه حركة الأرض. كان من المفترض أن يتأثر الشعاعان بالأثير بطريقتين معاكستين، وأن يكون هناك اختلاف

زمني طفيف في توقيت عودتهما إلى نقطة الانطلاق. وبما أن الموجات الكهرومغناطيسية تتذبذب بتردد معين، فإن الاختلاف الزمني الطفيف سيتجسد على صورة اختلاف في سعة تذبذبهما.

إذا لم تتوافق موجات الضوء بعضها مع بعض في ترددها، بمعنى أن موجات أحد الشعاعين تذبذبت أكثر قليلًا من موجات الشعاع الآخر نتيجة تأثرها بالأثير، فإن قمم وقيعان الشعاعين ستسببان حدوث تداخل في الحزم المعتمة والمضيئة. وبقياس سعة الموجات وعددها، أمكن الحصول على قياس غاية في الحساسية للسرعة النسبية للضوء المتحرك في اتجاهين متعاكسين. كان ميكلسون قد أجرى التجربة في البداية في برلين بمفرده، ثم أجرى تجارب أكثر دقة في الولايات المتحدة بالتعاون مع إدوراد مورلي. لم تُرصد أي تفرعات للتداخل، ومن ثم كان الاستنتاج هو أن الأرض لا تتحرك عبر الأثير، أو كما ذكر ميكلسون على نحو أكثر دقة: «إن فرضية الأثير الساكن خاطئة.»

هذا الاستنتاج صحيح من الناحية المنطقية؛ وفتحت تبعاته الباب أمام احتمالات أخرى مختلفة. أحد هذه الاحتمالات هو أن الأثير يشبه قصة الملك الذي كان يرتدي ملابس رائعة يستحيل أن يراها غير الحكماء في حين أن الجهال لا يرونها. بالطبع ادعى الجميع أنهم يرون ثياب الملك الرائعة إلى أن جاء طفل لم يكن قد أُخبر بالقصة وأعلن محقًّا أن الملك عارٍ. ويكمن وجه الشبه هنا في أنه لا يوجد أثير من الأساس، وهو ما صار أمرًا مسلمًا به بعد أعمال أينشتاين، التي سنستفيض في الحديث عنها لاحقًا. وكان الاحتمال الثاني هو أن الأرض تجر الأثير المحيط بها معها بفعل الاحتكاك. إذ تولد حركتنا عبر الأثير دوامات ضخمة، من ثم تتحرك أشعة الضوء عبر أثير ساكن نسبة إلى المعمل، حتى ونحن نتحرك كلنا خلال الأثير الانسيابي الأبعد.

أدرك نيوتن أن الأجسام تستشعر المقاومة حتى عندما تتحرك في الهواء. ولا بد من إزالة كل هذه العوائق من أجل تحقيق حالة الحركة الدائمة غير المتغيرة التي شكلت أساس قوانين الحركة التي وضعها، ومن هنا تعين أن يكون الأثير غاية في الرقة. على سبيل المثال، حددت قوانين نيوتن حركة الكواكب واستتبع هذا أن الكواكب تتحرك بحرية في ظل تأثير جاذبية الشمس؛ فلا مجال للتفاعل مع الأثير هنا. غير أن هذا خلق تناقضًا مباشرًا، لأنه لو أن الأرض تجر الأثير المحيط بها معها، فلا بد أنها تتفاعل معه وعندئذ تواجهنا مشكلة عند تطبيق ميكانيكا نيوتن على الكواكب. غير أن بعض الاقتراحات التخيلية طُرحت. كان جورج ستوكس (١٨١٩–١٩٠٣) فيزيائيًّا بريطانيًّا

يشتهر بدراساته للسوائل اللزجة، وقد اعتقد في صحة النظرية الموجية للضوء وأيضًا في الأثير، الذي رجح أنه يتصرف كالشمع، بحيث يكون جامدًا لكنه قادر على التدفق أيضًا عند الخضوع لقوة ما. وأدى هذا بدوره إلى اقتراح أن حركة الكواكب توفر هذه القوة التي تجعل الأثير يتدفق، وأنها تجر الأثير معها بفعل الاحتكاك، لكن لم يتم التوصل قط إلى دليل تجريبي على هذا. وقد أدى ذلك، بالإضافة إلى الطبيعة الارتجالية للاقتراح، إلى سقوطه.

ثمة بديل ثالث جدير بالملاحظة اكتشفه جورج فيتزجيرالد في إنجلترا وهندريك لورنتز في هولندا؛ إذ لاحظ كلاهما على حدة أنه إذا كانت الأجسام المتحركة خلال الأثير تنكمش في اتجاه حركتها بمقدار يعتمد على مربع نسبة سرعة الأرض إلى سرعة الضوء، وقتها لم تكن الحركة عبر الأثير لتلحظ، وهكذا يمكن تعليل النتائج التي توصل إليها ميكلسون ومورلي.

هكذا كانت الفكرة: افترض أن هناك قضيبًا طوله متر موضوعًا في حالة سكون على كوكب الأرض. والآن تخيل أن هذا القضيب يمر بسرعة إلى جوارك خلال الأثير. افترض لورنتز وفيتزجيرالد، محقين، أن القوى التي تبقي على المواد الصلبة، القضبان، متماسكة، هي القوة الكهرومغناطيسية، وأن الحركة خلال الأثير تعوقها. وباستخدام نظرية ماكسويل، حسبا أنه عند سرعة v نسبة إلى سرعة الضوء c، سينكمش القضيب في الطول بمقدار ضئيل للغاية:

$$\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}$$

وعندما تتحرك الأرض بسرعة ٣٠ كيلومترًا في الثانية يكون التأثير أقل من جزء واحد من المليون؛ أي ينكمش حجم القضيب البالغ طوله مترًا بنحو واحد على مائة من الميكرون.

حسب هذه النظرية كان الجهاز الذي يستخدمه ميكلسون ومورلي سينكمش طوله مع حركته خلال الأثير في حين أنه عندما يتحرك في الاتجاه المعاكس للأثير فإن طوله لن يتأثر. وهذا الاختلاف الطفيف في المسافة بين الطول المنكمش والخطوط المعاكسة غير المتغيرة يتوافق تمامًا مع التأخير الزمني المتوقع الذي بموجبه يعود الشعاعان متناظرين، وهو ما يتفق ونتائج تجربتهما. وفق هذا التفسير إذن، يمكن أن يعج الفضاء بالأثير ويستحيل تمامًا كشف الحركة عبره نظرًا لأن أجهزة القياس هي التي تخفيها!

قضى تفسيرهما أيضًا بأن الحركة خلال الأثير من شأنها أن تغير المقاومة لعجلة الجسم المتحرك، قصوره الذاتي أو كتلته، بنسبة قدرها $1/(1-(v^2/c^2))^{1/2}$. وبالتالي حين تقترب السرعة من سرعة الضوء، حيث $v = c$، تصبح الكتلة لانهائية. ونتيجة لذلك، يتطلب الأمر عندئذ مقدارًا لانهائيًّا من القوة كي يصل أي جسم كبير الحجم إلى سرعة الضوء. مع أن الفكرة بدت مُختلقة ولم تلق قبولًا بين الكثيرين كتفسير، وُجد في عام ١٩٠١ أن الإلكترونات المنبعثة من انحلالات بيتا، بسرعات مختلفة، كانت كتلتها تتباين باختلاف سرعتها، بما يتفق مع هذه المعادلة. مما لفت أنظار الناس إلى «تحويلات لورنتز-فيتزجيرالد» كما صارت تعرف فيما بعد.

ندرك اليوم أن هذه التحويلات المعتمدة على السرعة صحيحة. تنكمش الأطوال وتزيد الكتل بزيادة السرعة وذلك بنسبة قدرها $1/(1-(v^2/c^2))^{1/2}$ لكن ليس للأسباب التي رجحها كل من لورنتز وفيتزجيرالد. نظر أينشتاين إلى المشكلة من منظور جديد. إن ثبات سرعة الضوء مقارنة بسرعة المصدر أو المراقب يرجع جزئيًّا إلى انكماش المسافات كما في معادلة لورنتز وفيتزجيرالد، لكن هذا لا يرجع إلى تأثير الأثير على القضيب. من وجهة نظر أينشتاين الانكماش خاصية جوهرية من خصائص الفضاء نفسه. تتخذ المسافات والفواصل الزمنية كما يسجلها المراقبون عند سرعات مختلفة مقاييس مختلفة: فما يراه أحد المراقبين مكانًا هو مزيج من المكان والزمان لمراقب آخر. كونت هذه الأفكار، التي تعد أساس نظرية النسبية لأينشتاين، رؤية كونية جديدة بالكامل.

الفصل الخامس

السفر على متن شعاع ضوئي

أظهرت تجربة ميكلسون ومورلي أن الأرض لا تتحرك على نحو ملحوظ نسبة إلى الأثير. وقد اقترح لورنتز وفيتزجيرالد أن الأثير يشوش أجهزة القياس بحيث يحجب هذه الحركة، غير أن ألبرت أينشتاين أدرك أن ثمة تفسيرًا أكثر ثورية لهذا؛ أنه لا يوجد أثير من الأساس!

كانت حقيقة أن سرعة الضوء مستقلة عن سرعة كل من المصدر والمستقبل لغزًا، مع أنه لا يتضح إلى أي مدى كان أينشتاين واعيًا بهذه النتيجة (انظر القسم التالي). على كل حال، بدأ أينشتاين في التفكر في تناظر الأشياء مقارنة بالحركة. وإذا لم يكن هناك أثير فلا يوجد فضاء مطلق، ومن ثم لا توجد حركة مطلقة؛ فالحركة النسبية فقط هي التي لها دلالة مادية.

أدرك أينشتاين أن الضوء إشعاع كهرومغناطيسي حددت معادلات ماكسويل خصائصه. وفكر كيف سيبدو هذا الإشعاع لمراقبين اثنين يتحركان بشكل نسبي أحدهما إلى الآخر. ولهذا الغرض تحديدًا أجرى سلسلة من «التجارب الفكرية»، تتضمن تخيل مواقف معينة وفقًا لما تمليه قوانين الفيزياء.

تساءل أينشتاين في سن السادسة عشرة كيف سيكون الحال لو أنه سافر على متن شعاع ضوئي. إذا كان الضوء ذبذبات كهربائية ومغناطيسية تتحرك في الأثير مثلما تتحرك موجات الصوت في الهواء، فإن هذا يعني أنه مثلما ينتقل الصوت بسرعة ماخ واحد بالنسبة إلى الهواء، فإن الضوء ينتقل بسرعة ٣٠٠ ألف كيلومتر في الثانية بالنسبة إلى الأثير. وسرعة الضوء هذه عادة ما يُشار إليها بالرمز c. (من الآن فصاعدًا اعتبر أن الرمز c يشير إلى سرعة الضوء الثابتة). لم تكن هناك طائرات نفاثة في عام ١٩٠٠، لكن لو وُجدت في ذلك الحين، لتخيل طائرة نفاثة تطير بسرعة واحد ماخ، أي بسرعة

تساوي سرعة الصوت، وبهذا تطير بنفس سرعة موجات الضغط المنتشرة عبر الهواء. لو أحللنا الآن الأثير محل الهواء، والضوء محل الصوت، يمكننا تخيل السفر عبر موجة الضوء. لو صح هذا التشبيه لترتب على ذلك عواقب غريبة؛ أولًا: إذا نظرت في المرآة فستتلاشى صورتك، إذ إن الضوء الصادر عنك يتحرك نحو المرآة بنفس سرعتك ومن ثم لا يصل إلى المرآة مطلقًا، ناهيك عن أنه ينعكس أيضًا، إلى أن تصل أنت بنفسك إليها. يبدو هذا عجيبًا للغاية، لكن على حد علمي، ما من شيء يقضي بأن صورة الفرد حقيقة مطلقة بحيث تستحيل هذه النتيجة. ظهر التناقض الفيزيائي عندما فكر أينشتاين فيما ستسمح به نظرية ماكسويل. إذا تعقبت موجات متذبذبة من المجالين الكهربائي والمغناطيسي ولحقت بها أخيرًا، وسافرت إلى جانبها بسرعة الضوء c، فستتبين وقتها أن المجال الكهرومغناطيسي يتذبذب في الفضاء من جانب إلى جانب، لكن لا يتحرك إلى الأمام، ومن ثم ستظل ساكنًا. غير أن معادلات ماكسويل لم تقضِ بهذا الأمر: إن المجالات الكهرومغناطيسية تتحرك بسرعة الضوء. يبدو إذن أنه لو صحت نظرية ماكسويل عن الكهرومغناطيسية، وكل شيء نعرفه يؤكد أنها صحيحة، فمن المستحيل عندئذٍ أن يتحقق موقف السفر بسرعة الضوء الذي تخيله أينشتاين؛ فمن المستحيل تمامًا أن نصل إلى سرعة الضوء.

تسبب هذا في جعل أينشتاين يشرع في التفكير في تعريف السرعة ومفهومي المطلق والنسبي. ونتيجة لهذه التجربة الفكرية، تخيل أينشتاين أن ثمة مسافرًا على متن قطار يشاهد قطارًا آخر يمر بجانبه، وهي التجربة التي ألهمتها ظاهرة مررنا بها كلنا في وقت من الأوقات.

تخيل أنك تجلس في قطار متوقف بإحدى المحطات، وعلى قضيب السكك الحديدية المتاخم قطار آخر متوقف على نحو مؤقت أيضًا، لكنه متجه في الاتجاه العكسي. بدافع من تلهفك للتحرك تبدأ في ملاحظة أنك تتحرك مقارنة بعربات القطار المجاور، بسلاسة شديدة حتى إنك لا تشعر بقوة العجلة. لكن حين تمر بآخر عربة من القطار المجاور، تكتشف أنك لا تزال في مكانك بالمحطة، وأن القطار الآخر هو الذي غادر المحطة. يُفترض أن أينشتاين طرح السؤال التالي عندما كان يسافر من لندن أثناء دراسته بكلية كنيسة المسيح بجامعة أكسفورد في ثلاثينيات القرن العشرين إذ قال: «متى تصل أكسفورد إلى هذا القطار؟» (تُنسب هذه القصة على نحو مشكوك فيه إلى أينشتاين وجامعة كامبريدج، لكنني والناشرين موجودون في جامعة أكسفورد، تمامًا مثلما كان أينشتاين، منذ ٧٥

عامًا مضت). يوجد في هذه الأمثلة مفهوم للسكون المطلق، وبالتحديد في موقف محطة القطار والأرض المحيطة بها. ذهب أينشتاين أيضًا إلى أنه إذا أُجريت هذه التجربة باستخدام قطارين يتحركان بسرعة ثابتة في الفراغ دون وجود لأثير يحدد حالة السكون التام، فلن تكون هناك وسيلة لنحدد بها أيهما كان يتحرك وأيهما كان ساكنًا. طبقًا لمعادلات ماكسويل التي تصف سلوك المجالين الكهربائي والمغناطيسي، سيكون لدينا نتيجتان متطابقتان للقطارين، وستبدو سرعة الضوء تحديدًا ثابتة للقطارين.

أثبت ميكلسون ومورلي هذه الظاهرة تجريبيًّا، مع أن هناك جدلًا حول هل كان أينشتاين على وعي بهذا أم أنه استنتج أن سرعة الضوء ثابتة من خلال التجربة الفكرية المذكورة آنفًا. زعم أينشتاين في مناسبات مختلفة أنه لم يكن يعرف التجربة في عام ١٩٠٥ عندما وضع نظرية «النسبية الخاصة». غير أنه في عام ١٩٥٢ أخبر أبراهام بايس أنه كان على علم بها قبل عام ١٩٠٥، من خلال قراءته لأبحاث لورنتز وأنه «افترض أن نتيجة ميكلسون هذه حقيقية». أيًّا كان الأمر، فالظاهرة موجودة ومحيرة لأنها تتعارض مع الحدس، إلا إذا كانت الأفكار «المنطقية» عن المكان والزمان، كما صيغت وقُبلت منذ وقت نيوتن، خاطئة.

المكان، الزمان، والزمكان

تقيس السرعة المسافة المقطوعة خلال فترة زمنية. وبمقتضى «الحس العام»، أو بالأحرى، بمقتضى قوانين إسحاق نيوتن، فإن وحدات المتر والكرونومتر، التي تقيس المكان والزمان، واحدة للجميع. والسرعة هي نسبة المسافة المقطوعة إلى الوقت المنقضي، والسرعات النسبية تزيد أو تنقص حسب ما إذا كنا نتجه نحو الشيء المُسرع أم نبتعد عنه. غير أن «الحس العام» أخفق فيما يتعلق بأشعة الضوء، لأنه مهما تكن سرعتك أو اتجاه حركتك، فإن سرعتك النسبية ثابتة بالنسبة لشعاع الضوء. وقد أدرك أينشتاين أن ثمة خطأً ما في مفهومنا عن المكان والزمان.

ما المقصود بالتزامن؟ إذا وقع شيئان «في الوقت نفسه»، لشخصين أحدهما على كوكب الأرض والآخر رائد فضاء على كوكب المريخ، كيف لهما أن يعرفا أن ساعتيهما متزامنتان؟ إذا استطعنا أن نبعث إشارة زمنية إلى كوكب المريخ في الحال، عندئذ سيكون كل شيء على ما يرام، لكن في حقيقة الأمر ثمة تأخير زمني لأن الإشارة الزمنية تستطيع أن تسافر بسرعة الضوء فحسب. وعندما يتسلم رائد الفضاء على كوكب المريخ إشارتنا

يمكنه أن يبعث لنا بإشارة ليؤكد تسلمه الإشارة الأولى، وعندئذ يمكننا أن نضبط ساعتنا تبعًا لذلك. يبدو الأمر بسيطًا. لكن الكواكب في حالة حركة؛ للوهلة الأولى يمكن أن يُؤخذ هذا أيضًا بعين الاعتبار، غير أن تجربة أخرى من تجارب أينشتاين الفكرية تكشف، على الأقل من الناحية الاستعارية، أن الأمر ينطوي على أكثر مما يبدو للعيان.

لا بد أن أينشتاين كان مغرمًا بالقطارات. تخيل أنك تقف في منتصف قطار لا يتحرك، وأنك ترسل إشارة ضوئية إلى سائق القطار بالعربة الأمامية والحارس بالعربة الخلفية. سيتسلم الرجلان الإشارة الضوئية في اللحظة عينها. هذه الحقيقة سيتفق معك فيها شخص يقف بجوار خط السكك الحديدية. والآن افترض أن القطار يتحرك بسرعة ثابتة ولم يعد ساكنًا. أنا أقف على الرصيف بجوار القطار في اللحظة التي تمر بي فيها وأنت ترسل الإشارة الضوئية إلى السائق والحارس، سترى أنت أن الإشارة تصل إليهما في اللحظة نفسها، لكنني لن أرى هذا لأن الضوء لا يصل إلى هناك بشكل فوري؛ ففي اللحظة التي استغرقها شعاع الضوء كي ينتقل من منتصف القطار إلى طرفيه، تكون مقدمة القطار قد ابتعدت عني في حين أن مؤخرته دنت مني. ومن الزاوية التي أقف بها ستصل الإشارة إلى الحارس قبلما تصل السائق بعدد قليل من النانوثانية (النانوثانية هي جزء على المليار من الثانية. يتحرك شعاع الضوء بسرعة ٣٠ سنتيمترًا في النانوثانية، أو قدم حسب وحدة القياس القديمة التي تعادل طول قدمك تقريبًا)، في حين أنك تصر أن الإشارة الضوئية وصلتهما بالتزامن في اللحظة نفسها. فالتزامن كما يرصده شخص على متن القطار ليس هو التزامن بالنسبة لشخص يقف على الرصيف بجوار القطار، ويتوقف تعريفنا للفترات الزمنية؛ أي انقضاء الوقت، على حركتنا النسبية.

كان أينشتاين قد أدرك أن الحقيقة العجيبة التي مفادها أن سرعة الضوء ثابتة، بمعزل عن حركة المستقبل أو المرسل، ترتبط بطريقة أو بأخرى بفكرة اختلاف الزمن المنقضي بالنسبة للأشخاص الذين هم في حالة حركة بالنسبة إلى بعضهم البعض. ثمة طريقة «طبيعية» واحدة حتى يمكن لسرعة الضوء أن تظل ثابتة على الدوام، وهي أن تكون مطلقة، وفي تلك الحالة تنتقل الإشارات على الفور ومن ثم لا حاجة بنا إلى أن نفكر مليًّا فيما ينطوي عليه تعريف الفترات الزمنية وقياسها ومقارنتها. فسرعة الضوء في حياتنا اليومية سرعة محددة، وتلك الفوارق الزمنية الطفيفة لا يمكن ملاحظتها. تمثلت فكرة أينشتاين العبقرية في أنه لَمَّا كانت سرعة الضوء محددة وثابتة، فإن هذا يعني أننا لا بد أن نعيد النظر في الأشياء التي اعتبرناها قبلًا بديهية، إن كنا قد فكرنا بها من الأساس.

درس أينشتاين النتائج المنطقية وتوصل إلى أنه عندما تُقاس الفترات الزمنية، والمسافات أيضًا، في أحد أطر القصور الذاتي فإنها تختلف عندما تُقاس في إطار قصور ذاتي آخر، ويعتمد عدم التوافق على السرعة النسبية بين إطاري القصور الذاتي. تنكمش الفترات الزمنية ويتمدد الزمن بالقدر عينه، وبالنسبة للشخصين اللذين يتحركان بسرعة معينة، قدرها v، بالنسبة لبعضهما البعض تكون النسبة $\sqrt{(1-(v^2/c^2))}$، وهي النسبة نفسها التي استحدثها لورنتز وفيتزجيرالد في نظريتهما المتعلقة بالأثير. وفقًا للسرعات التي نألفها في حياتنا اليومية العادية، هذا المعامل قليل لدرجة تجعل هذه المفاجآت تمر دون أن تُلحظ، لكن بالنسبة للجسيمات الذرية سريعة الحركة، مثل تلك الموجودة في الأشعة الكونية أو مختبرات معجلات الجسيمات كمختبر سيرن، تعد تأثيرات النسبية في غاية الأهمية.

من الجسيمات التي يشيع وجودها في الأشعة الكونية جسيم يُسمى «الميوون». يبلغ عمر الميوون جزءًا على المليون من الثانية فحسب. ولمَّا كانت الميوونات تنبعث من الأشعة الكونية عند قمة الغلاف الجوي، أي عند ارتفاع ٢٠ كيلومترًا فوق سطح الأرض، وتتحرك بسرعة ٣٠٠ مليون متر في الثانية تقريبًا، فستتمكن الميوونات من السفر لمسافة حوالي ٣٠٠ متر على الأكثر في حياتها كلها. الأمر الرائع أنها ستتمكن من الوصول إلى الأرض، فميوونات الأشعة الكونية تخترق صفحة هذا الكتاب الآن. كيف يمكن للميوونات أن تسافر مسافة ٢٠ كيلومترًا من الغلاف العلوي في جزء على المليون من الثانية؟ يستحيل هذا. يمكن تفسير هذا بأن الزمان والمكان من منظور الميوون سريع الزوال لهما معدل مختلف عن ذلك الذي يعيه المراقب على الأرض.

ينقضي جزء على المليون من الثانية حسب توقيت الميوون، لكن التحرك بسرعة كبيرة نحو الأرض وفق المعادلة $1/\sqrt{(1-(v^2/c^2))}$ قد يستغرق بضعة آلاف الأجزاء على المليون من الثانية. سيمتد الزمن المُقاس وفقًا لساعة موجودة على الأرض بمقدار عدة مئات الأجزاء على الثانية، وهو ما يعد كافيًا كي يقطع الميوون مسافة ٢٠كم.

وهكذا يمكن تفسير التناقض في ضوء مصفوفة الزمكان التي يعيش فيها المراقب الموجود على الأرض، لكن كيف يمكن تفسيرها من منظور الميوون؟ من منظور الميوون، يعتبر الميوون نفسه ساكنًا والأرض هي التي تندفع نحوه. والمسافة التي يقيسها المراقب الموجود على الأرض على أنها تبلغ ٢٠ كيلومترًا تنكمش من منظور الميوون إلى كسر يسير نسبته $\sqrt{(1-(v^2/c^2))}$، وهو ما يجعل المسافة تبدو من منظور الميوون بضعة أمتار

معدودة فحسب. سيكون لدى الميوون جزء على المليون من الثانية ليعيشه، وسيقطع فيه بضعة أمتار، وهذا لن يمثل له مشكلة.

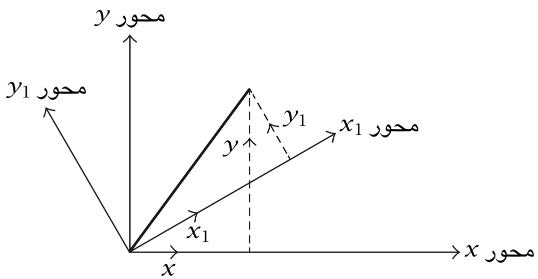
يرتبط انكماش الطول بتمدد الزمن على نحو دقيق، ومن ثم تكون سرعة الضوء — التي أبعادها هي نسبة المسافة والزمن — هي نفسها سواء للميوونات المتحركة أو للعلماء الساكنين على الأرض. لو كان الضوء يتحرك بسرعة لانهائية بحيث يمكن إرسال الإشارات بشكل فوري، لما استبد بنا القلق بشأن أي من هذه الأشياء «غير الطبيعية»، ولكان قياس الفترات الزمنية والمسافات المكانية واحدًا للجميع. في مثل هذه الحالة كانت الميوونات ستتمكن أيضًا من أن تسافر بسرعة لانهائية تجعلها تصل إلى الأرض بشكل فوري. إن حقيقة أن سرعة الضوء محددة هي التي تجعل بنية المكان والزمان تتوقف على سرعتنا، ولأن سرعة الضوء كبيرة ومحددة فنحن في المعتاد لا نشعر بها في شئون حياتنا البطيئة.

مع أن الفترات الزمنية والمسافات المكانية تختلف من إطار لآخر، كشف تحليل أينشتاين أن مزيجًا معينًا يظل كما هو. وهذا يكون صورتنا الحديثة عن الزمكان. يمكن تصوير المزيج الثابت من خلال مبدأ مألوف في الهندسة في بعدين أو ثلاثة أبعاد، لكنه يمتد إلى بعد رابع؛ ثلاثة أبعاد مكانية بالإضافة إلى الزمن الذي يُعامل كبعد رابع.

الزمكان

كانت نظرية ماكسويل المتعلقة بالظواهر الكهربائية والمغناطيسية — حيث يتمتع الإشعاع الكهرومغناطيسي بسرعة واحدة ثابتة — هي التي قادت إلى رؤى كونية جديدة لأينشتاين كما عبر عنها في نظرية «النسبية الخاصة». أثبت أينشتاين أن مبدأ نيوتن لأطر القصور الذاتي، بشبكته الاستعارية المتكونة من قضبان القياس والتدفق الثابت للزمن، ما هو سوى تقريب لصورة أكثر عمقًا. ثم لاحظ عالم الرياضيات الألماني هيرمان مينكوفسكي أن هذه النظرية تقلدت شكلًا مألوفًا إذا صار المكان والزمان ممتزجين معًا فيما أصبح معروفًا باسم الزمكان رباعي الأبعاد. نعرف جميعنا نظرية فيثاغورس للمثلث القائم الزاوية في بعدين، التي تقضي بأنه إذا كان x وy هما طولا الضلعين الأفقي والرأسي، عندئذ يساوي مربع الوتر s مجموع مربعي الضلعين الآخرين: $s^2 = x^2 + y^2$. يمكن التفكير في x وy على أنهما خَطَّا الطول والعرض لنقطة ما؛ يمكننا أن ندير الخريطة فنحصل على خطوط جديدة للطول والعرض، مُدارة مقارنة بموضعها السابق،

لكن الخطين يظلان متعامدين أحدهما على الآخر. ويظل مربع الوتر الذي يربط بين الخطين الجديدين يساوي مجموع مربعيهما حتى عند إدارة الخريطة (انظر الشكل ٥-١). في الأبعاد الثلاثة لدينا العرض والطول والارتفاع فوق سطح الأرض z، وعندئذ يُعَمَّم مقياس المسافة الثابتة بحيث يصير $s^2 = x^2 + y^2 + z^2$. وينطبق هذا على أي إطار قصور ذاتي: فسواء أُديرت الخطوط أو أزيحت، تظل المسافة s^2 كما هي.



شكل ٥-١: أخبرنا فيثاغورس أن $s^2 = x^2 + y^2$ بصرف النظر عن الاتجاه العمودي للضلعين x وy.

في النسبية الخاصة، مع انتقال المرء من إطار مرجعي إلى آخر يكون هذا المقدار متغيرًا. في الإطار سريع التحرك تنكمش المسافات. لكن الساعات الزمنية أيضًا تسجل الزمن بمعدلات مختلفة. ويتضح أن التوليفات التالية للمكان والزمان في إطارين تظل ثابتة: $s^2 = x^2 + y^2 + z^2 - c^2 t^2$ حيث ترمز c إلى سرعة الضوء (الثابتة). اقترح مينكوفيسكي أن يُنظر إلى الزمان والمكان على أنهما زمكان واحد رباعي الأبعاد، على أن الجانب المختلف اختلافًا طفيفًا لبعد الزمان مقابل بعد المكان تطوقه جزئيًّا علامة السالب التي تظهر أمام الإحداثي الزمني، في مقابل العلامات الموجبة التي تخص الإحداثيات المكانية.

كل هذه الأفكار العميقة نبعت من التفكير في الكيفية التي تبدو عليها الظواهر الكهرومغناطيسية للمراقبين في أطر القصور الذاتي المختلفة (كان عنوان بحث أينشتاين هو «عن الديناميكية الكهربائية للأجسام المتحركة»). ولم تشتمل قط التجارب الفكرية على تأثيرات الجاذبية، مما جعل أينشتاين يدرك أن نظريته ناقصة، فالإلكترون والبروتون

داخل ذرة الهيدروجين يتفاعلان من خلال القوة الكهرومغناطيسية، ومن خلال الجاذبية أيضًا؛ لذا لا بد أن يكون نسيج الزمكان هو نفسه في كلا التفاعلين، لأنهما لو كانا مختلفين، فلمن ستكون السيادة على الآخر؟ بصفة عامة، كان من المستحيل تصور أن الفراغ الذي تحدث فيه الظواهر الكهرومغناطيسية يعمل بنسيج زمكان يختلف عن ذلك الذي ينطبق على قوة الجاذبية المنتشرة في جميع الأرجاء.

بمقتضى نظرية الجاذبية لنيوتن، تتفاعل الشمس والأرض في الحال، غير أنه وفقًا لنظرية النسبية لأينشتاين التي صاغها عام ١٩٠٥، فمثل هذه التفاعلات يمكن أن تنتقل بسرعة الضوء فحسب، وهو ما يعني أن الزمن ينقضي في تفاعلات الجاذبية كما الحال مع القوى الكهرومغناطيسية. قد يبدو هذا غير وثيق الصلة من الناحية الواقعية لأن الكواكب تتحرك حول الشمس بسرعة تقل عن جزء على الألف من سرعة الضوء، وهي سرعة «منخفضة» لا مجال فيها للمؤثرات المتعلقة بنظرية النسبية. غير أن ثمة مسألة مبدأ هنا، وقد حسمها أينشتاين بنظرية النسبية العامة التي نشرها عام ١٩١٦.

الفصل السادس

تكلفة الفضاء الخاوي

زمكان منحنٍ

خرج أينشتاين بنظرية النسبية الخاصة من التجارب الفكرية التي تتضمن الإشعاع الكهرومغناطيسي؛ أي الضوء. وعقب هذا مارس التجارب الفكرية مع الجاذبية، وهو ما قاده إلى نظرية النسبية العامة.

كان أينشتاين قد توصل إلى نظرية النسبية الخاصة في ضوء الافتراض بأنه لا توجد حالة مطلقة من السكون التام. وقد جاءت نظرية النسبية العامة انطلاقًا من فكرة أنه لا يوجد مقياس مطلق للقوة والعجلة. أولًا، تفكر في مشكلة النسبية عندما تُقحَم فيها الجاذبية. قامت النسبية الخاصة على الحقيقة المسلم بها القائلة إن سرعة الضوء ثابت كوني. فالضوء له طاقة، وبما أن الجاذبية تؤثر ليس فقط على الكتلة وإنما أيضًا على الطاقة بكافة أشكالها، عندئذ لا بد أن ينحرف شعاع الضوء بفعل الجاذبية عندما يمر بالقرب من جسم ضخم كالشمس. وبما أن الجاذبية تملأ الكون، وتُحرِّف أشعة الضوء على الدوام، فإن مبادئ النسبية التي افترضت أن الضوء يتحرك في خطوط مستقيمة بسرعة ثابتة بدا أنها لن تستطيع الصمود إلا إذا أخرجت الجاذبية من المعادلة بطريقة ما. سرعان ما أدرك أينشتاين أن هذا يشكل مشكلة، واستغرق الأمر منه عشر سنوات ليفك طلاسمها تمامًا. وجاءت فكرة أينشتاين العبقرية العظيمة عندما أدرك أن الجاذبية يبطل أثرها بالفعل في حالة الجسم الذي يسقط سقوطًا حرًّا؛ بمعنى أنه لا توجد قوة صافية تؤثر على الجسم ومن ثم سيتحرك بسرعة ثابتة.

الكتلة الحجرية الساقطة ليس لها وزن. وإذا التقطتها، فإن ما تشعر به على أنه وزن لها هو في حقيقته القوة التي لا بد أن تستخدمها كي تمنع الحجر من السقوط إلى الأرض. إن الأرضية الصلبة التي نقف عليها هي التي تمنعنا من السقوط إلى مركز

الأرض، ومقاومة الأرضية — القوة التي تبذلها كي تحول دون سقوطنا — هي ما نشعر به بوصفه وزننا. فلو اختفت الأرضية تمامًا، فسنسقط إلى مركز الكوكب منعدمي الوزن.

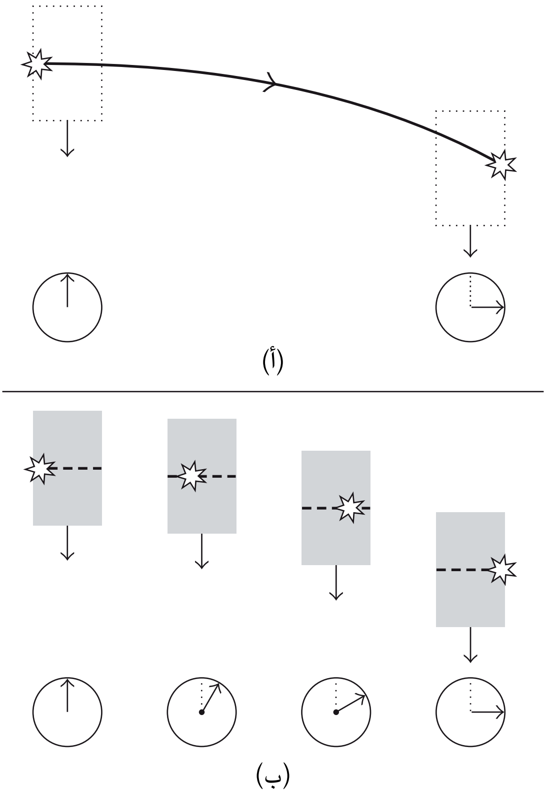
كانت هذه نقطة الانطلاق نحو تجربة أخرى من تجارب أينشتاين الفكرية.

افترض أنك بمقصورة تسقط سقوطًا حرًّا، ولا توجد نوافذ لتطل منها على الخارج. ربما تكون داخل مصعد ساقط، أو على نحو أقل وطأة، داخل قمر صناعي يدور حول الأرض. في الحالة الثانية ستكون أنت والقمر الصناعي في حالة سقوط حر، لكنكما تتحركان «أفقيًّا» أيضًا بسرعة تتوافق مع معدل تقوس الأرض، بحيث تتقوس الأرض مبتعدة عنك بنفس معدل سقوطك نحوها. في كلا المثالين، لن يكون هناك أي شعور بقوة الجاذبية في المنطقة المحيطة بك مباشرة. على سبيل المثال إذا أَفْلَتَّ كرة فإنها ستنجذب إلى الأرض بفعل الجاذبية بنفس معدل انجذابك أنت نحوها بالتمام، ومن ثم ستظل الكرة ثابتة مقارنة بك. يبدو رواد الفضاء طافين بداخل مقصوراتهم للسبب عينه؛ فهم والقمر الصناعي «يسقطون» بالمعدل ذاته. ومع أننا نعلم أن رواد الفضاء يسقطون في مجال جاذبية الأرض، فإنهم لا يشعرون بأي قوة جذب، وداخل مقصوراتهم المغلقة لهم كل الحق في اعتبار أنفسهم في حالة سكون. وقد أدرك أينشتاين أن الجاذبية تتلاشى فعليًّا في حالة السقوط الحر «عديم الوزن».

ينطبق هذا أيضًا على أشعة الضوء. ينجذب شعاع الضوء نحو أي جسم هائل بالمعدل نفسه الذي تنجذب به الأجسام الضخمة العادية. تأكد هذا خلال الكسوف الكلي للشمس عام ١٩١٩، عندما شُوهدت النجوم البعيدة وقد أزيحت عن مكانها «الطبيعي» بسبب أن ضوءها انحرف حين مر بمجال جاذبية الشمس.

أدرك أينشتاين هذا في عام ١٩١١، قبل إتمام نظرية النسبية العامة. وبحلول عام ١٩١٦ كان قد أتم النظرية بأكملها، التي كشفت عن أن التأثير سيكون ضعف ذلك التأثير الذي ظنه في البداية، وذلك نتيجة تقوس كل من المكان والزمكان. وقد صُرف النظر عن محاولة لاختبار تنبئه (الخاطئ) أثناء الكسوف الكلي عام ١٩١٥ بسبب الحرب العالمية.

وأنت داخل المقصورة التي تسقط سقوطًا حرًّا، إذا سلطت مصباحًا أفقيًّا بالنسبة لأرضيتها، فإنه إذا قام أحدهم على الأرض بقياس دقيق فلسوف يجد أن شعاع الضوء قد تقوس تقوسًا طفيفًا لأنه «تأثر» بالجاذبية. ففي اللحظة اليسيرة التي عبر فيها



شكل ٦-١: يُشغل مصباح ضوئي نحو جانب صندوق في حالة سقط حر. يعبر شعاع الضوء الصندوق، وتؤثر الجاذبية على كل من الشعاع والصندوق وتشدهما نحو الأرض. في الشكل (أ) نرى مسارًا منحنيًا كما يُرى من الأرض خلال الأجزاء القليلة على المليار من الثانية المنقضية. في الشكل (ب) نرى التتابع نفسه كما يُدرَك من جانب شخص موجود داخل الصندوق. بما أن كلًّا من الصندوق وشعاع الضوء يسقطان بالمعدل ذاته، فسيبدو شعاع الضوء وكأنه يعبر الصندوق في خط أفقي مستقيم.

الشعاع من أحد جانبي المقصورة إلى الجانب الآخر، فإنه سقط نحو الأرض بنفس مقدار سقوط الجدار المقابل. وعليه، سيبدو داخل المقصورة أن الضوء انتقل في خط مستقيم،

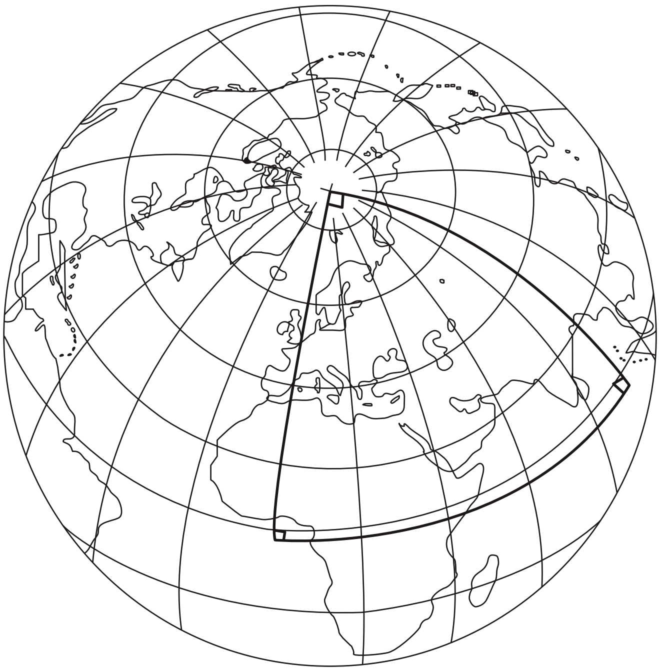
ومجددًا، سترى أن كل شيء يتماشى مع تفسيرك أنك في حالة سكون في بيئة منعدمة القوى.

افترض أنك في سرب من المركبات الفضائية، وكل مركبة تبتعد عن المركبة المجاورة لها بكيلومتر واحد بالضبط، وكل المركبات تسقط نحو الأرض. مع أن رواد الفضاء في مثل هذه الحالة قد يحسبون أنفسهم في حالة سكون أو حالة حركة منتظمة في خطوط متوازية مستقيمة، بعد فترة وجيزة سيبدءون في ملاحظة أن كل المركبات يقترب بعضها من بعض. يُعزى هذا إلى أن كل مركبة في حالة سقوط حر نحو مركز الكوكب البعيد، لذا فمساراتها تتلاقى عند نقطة واحدة. خطرت لأينشتاين تلك الفكرة العبقرية القائلة إن تأثير الجاذبية يجعل مسارات الأجسام التي في حالة سقوط حر تتلاقى.

تدفقت الرؤى العميقة عندما رأى أينشتاين وجه الشبه بين هذه الصورة وبين تلاقي خطوط الطول عند القطبين الشمالي والجنوبي للكرة الأرضية. عندما تُمثَّل الخطوط على سطح مستوٍ، مثل مسقط المركاتور، تكون هذه الخطوط متوازية، لكن عندما تكون على سطح الأرض المنحني فإن «الخطوط المستقيمة» تكون متوازية في البداية عند خط الاستواء، لكن وهي تتجه شمالًا فإنها تتلاقى تدريجيًّا إلى أن تتجمع كلها في آخر المطاف عند القطب. يُعزى هذا إلى أن سطح الأرض ثنائي الأبعاد يتقوس في بعد ثالث. خرج أينشتاين حينها باستنتاج رائع مفاده أن خطوط السقوط الحر في مجال الجاذبية تشبه خطوط الطول على أي «سطح» يتقوس في بُعد أعلى. تخيل أينشتاين أن «السطح» ثلاثي الأبعاد للفضاء يتمدد بفعل الكتل الهائلة. إننا ندرك حركة السقوط الحر على امتداد هذه التقوسات بوصفها انحرافًا عن الخطوط «المستقيمة»، ونفسرها على أنها حدثت بفعل قوة الجاذبية.

كي نرى كيف دمج أينشتاين هذا في وصفه للزمكان، دعونا نتناول مثالًا ثنائي الأبعاد. لنسترجع أولًا نظرية فيثاغورس القائلة إن مربع وتر المثلث القائم الزاوية يساوي مجموع مربع ضلعي الزاوية القائمة: $s^2 = x^2 + y^2$. ينطبق هذا على السطح المستوي حيث يكون مجموع الزوايا داخل المثلث ١٨٠ درجة بيد أن هذا لا ينطبق بالضرورة على السطح المنحني. يمكن رؤية هذا بسهولة إذا تخيلنا أننا نقوم بجولة دائرية تكون فيها أول محطة على امتداد خط الاستواء بداية من خط جرينيتش بزاوية ٩٠ درجة شرقًا. من عند هذه النقطة اتجه يسارًا بزاوية ٩٠ درجة واتجه شَمالًا طوال الطريق إلى القطب الشمالي. إذا اتجهت يسارًا الآن بزاوية ٩٠ درجة أيضًا واتجهت جنوبًا (من

القطب الشمالي تكون كل الاتجاهات جنوبًا!) فستتجه صوب خط جرينيتش إلى أن تصل في نهاية المطاف إلى نقطة البداية الأصلية على خط الاستواء، متممًا مثلثًا يحتوي على ثلاث زوايا قائمة. حين يتجاوز مجموع زوايا المثلث ١٨٠ درجة فإن هذا مؤشر فعلي على أنك لست في مكان مسطح، ومن البديهي أن تصير نظرية فيثاغورس غير قابلة للتطبيق؛ فأي من هذه الأضلاع الثلاثة هو الوتر؟!



شكل ٦-٢: صورة للكرة الأرضية مرسوم عليها مثلث. يمتد أحد أضلاع المثلث من خط الاستواء إلى القطب الشمالي على امتداد خط جرينيتش، تمتد قاعدة المثلث على امتداد خط الاستواء من خط جرينيتش بزاوية قدرها ٩٠ درجة شرقًا (أو غربًا)، أما الضلع الثالث فيمتد من خط الاستواء بزاوية قدرها ٩٠ درجة شرقًا (أو غربًا).

ثمة مفاجآت أخرى تتعرض لها عندما تعيش على سطح منحنٍ: كيف يكون شكل الخط المستقيم، وكل الخطوط يتعين عليها أن تتقوس على الأقل في بعد واحد؟

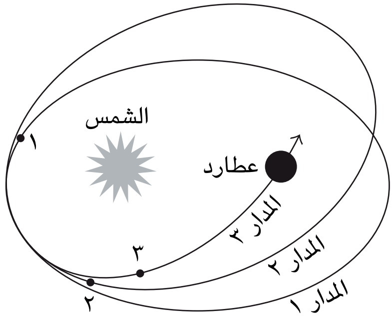
الخط المستقيم هو أقصر مسافة بين نقطتين على سطح مستوٍ. أدرك أينشتاين أن مفهوم أقصر مسافة مفهوم جوهري؛ ففي الزمكان المنحني بفعل الجاذبية، يتبع الضوء أقصر طريق بين نقطتين. على سطح الأرض تُعرف أقصر الطرق هذه بالدوائر العظمى. كي تطير من لندن عند دائرة عرض ٥٥ شمالًا إلى لوس أنجلوس عند دائرة عرض ٣٠، قد تتوقع على نحو ساذج أن تحلق في اتجاه الجنوب الغربي، في حين أن رحلتك عبر إحدى الدوائر العظمى ستحلق بك في اتجاه الشمال الغربي نحو جزيرة جرينلاند وفوقها. تُعرف هذه الدوائر العظمي رسميًّا باسم «الجيوديسيات» بمعنى «مقسمات الأرض». المعادلة التي تفسر العلاقة بين المسافات التي توجد حول المثلثات أكثر تعقيدًا من الشكل الذي وضعه فيثاغورس وتقتضي معرفة بكيفية تقوس السطح، وكيفية ارتباط قياسات الأطوال بالزوايا، وهو ما يعني باللغة المتخصصة المعرفة بـ «مترية» السطح. تطلب هدف أينشتاين المتمثل في وضع نظرية للجاذبية بوصفها زمكانًا منحنيًا، الإجابة عن سؤالين: (١) بوضع تنظيم المادة في الاعتبار، ما شكل مترية الزمكان؟ (٢) بوضع شكل المترية في الاعتبار، كيف تتحرك الأجسام داخلها؟

إن لم توجد مادة، فإن مترية الزمكان ستعطينا العلاقة التي رأيناها بالفعل، $s^2 = x^2 + y^2 + z^2 - c^2 t^2$، ويُقال إن الزمكان مسطح. لكن عندما توجد المادة فإن العلاقة بين المسافات والزمن تتغير، ويكون الزمكان منحنيًا.

جاءت أشهر الأدلة على تقوس الزمكان في مجموعتنا الشمسية من مدار كوكب عطارد، الذي يأخذ الشكل البيضاوي على غرار بقية الكواكب، لكن يستمر حضيضه الشمسي في حركة دائرية. فلكونه أقرب كوكب إلى الشمس، يستشعر عطارد أقوى قوة جذب، ويتحرك أسرع من بقية الكواكب، ويكون أكثرها عرضة لتأثيرات النسبية. يتسبب تقوس الفضاء في جعل المسافة حول الشمس تختلف اختلافًا طفيفًا عن قيمتها وفق رؤية نيوتن عن الفضاء المسطح، وهو ما يترتب عليه أنه بعد إتمام دورة كاملة حول الشمس، لا ينتهي المسار عند نقطة البداية عينها كما سيحدث طبقًا لتصور نيوتن. وعليه يختلف مدار كوكب عطارد من عام إلى آخر، بما يتفق مع نظرية أينشتاين.

يرى أينشتاين أن الزمكان يبدو شبيهًا بمادة صلبة مرنة؛ كفرخ المطاط. تظهر قوة الجاذبية في هذه الصورة عندما توجد كتلة ضخمة، مثل الأرض أو الشمس، في حالة سكون في الوسط وتسبب تشوهه. إذا تسارعت الكتلة، كما يحدث مثلًا عندما يدور نجمان أحدهما حول الآخر، أو عندما ينهار نجم فجأة وينفجر كما الحال مع المستعرات

العظمى (السوبرنوفا)، تقضي النظرية بأن موجات الجاذبية تنتشر في الوسط كما الحال عندما ينشر زلزال موجاته الاهتزازية في الأرض الصلبة.



شكل ٦-٣: مسار الحضيض الشمسي لكوكب عطارد. النقاط ١ و٢ و٣ تشير إلى أقرب نقاط الدنو على المدارات المتتابعة.

لا يزال هذا التنبؤ بإمكانية وجود إشعاع للجاذبية لم يتم التحقق منه تجريبيًّا، بمعنى الكشف الفعلي عن وجود مثل هذه الموجات، لكن ثمة دليلًا غير مباشر على وجودها. يدور نجمان، يُعرفان باسم الثنائي النابض PSR 1913+16، أحدهما حول الآخر كل ٧ ساعات و٤٥ دقيقة. يشع النجم النابض إشعاعًا كهرومغناطيسيًّا في نبضات، كضوء المنارة، كل جزء على ستمائة من الثانية. أنت ترى الوميض المنبعث من المنارة فقط حين يكون الشعاع الدائري منبعثًا باتجاهك، ولا ترى شيئًا عندما يُوجَّه في أي اتجاه آخر. يوحي الفاصل الزمني الذي مدته جزء على ستمائة من الثانية والذي يفصل بين كل ومضتين متعاقبتين أن النجم النابض يلف سبعة عشر مرة كل ثانية. بمقتضى نظرية أينشتاين، سيبعث مثل هذا النظام الطاقة في صورة موجات جاذبية وسينخفض تدريجيًّا الوقت الذي يستغرقه في الدوران. قِيسَ هذا التغير على يد عالمي الفلك جوزيف تايلور وراسل هالس ووجدا أنه يتفق مع تنبؤات أينشتاين، وقد فازا عن هذا العمل بجائزة نوبل عام ١٩٧٥.

بعد هذا التأكيد على نظرية أينشتاين، نأتي إلى صورة الزمكان باعتباره وسطًا مرنًا، وهو ما يذكرنا بالأثير نفسه الذي ساهم عمل أينشتاين على الإشعاع الكهرومغناطيسي

ونظرية النسبية الخاصة بدور كبير في دحض وجوده. بيد أن النسبية لا تقضي بعدم وجود الأثير، بل هي تقضي بأن أيًّا ما كانت المادة التي يتألف منها هذا الأثير فلا بد أن تتفق في سلوكها مع مبادئ النسبية! من الأمثلة المشابهة للأثير المجال الكهربائي، الذي يستحيل أن تراه ما لم تجعله يتذبذب؛ عندئذ يمكن أن تراه فعليًّا. وفق مفهوم النسبية يتطلب الأثير وجود كل من المجالين الكهربائي والمغناطيسي، واللذين تنتقل التغيرات فيهما بسرعة الضوء. وعلى غرار أثير مجال الجاذبية، تنتقل موجات الجاذبية — تموجات نسيج الزمكان — بسرعة الضوء الكونية أيضًا.

الجاذبية والانحناء

الفضاء «المسطح» هو الفضاء الذي لا تتلاقى فيه الخطوط المتوازية أبدًا، وهو كل ما انتهت إليه معرفة إقليدس ونيوتن، أما في الفضاء المنحني تتجه هذه الخطوط بعضها نحو بعض، ويعتبر المعدل الذي تتلاقى به الجيوديسيات هو مقياس الانحناء. صاغ أينشتاين نظرية النسبية العامة عن طريق ربط الانحناء بمجال الجاذبية. وهذا ما فعله.

المكان والزمان، أو المجالان الكهربائي والمغناطيسي، ينفصلان بوضوح فحسب من وجهة نظر أحد المراقبين، لكن لمراقب آخر في حالة حركة نسبية بحيث إنه في حالة تداخل الزمكان، تظل الكهرومغناطيسية هي الثابت الحقيقي الوحيد. تنطبق ملاحظات شبيهة على الطاقة والزخم؛ «فمزيج الطاقة والزخم» هو الذي يقوم بدور المقياس النسبي للحركة في الزمكان. أثبت أينشتاين هذا في نظرية النسبية الخاصة عام ١٩٠٥، التي لم تضع الجاذبية في الاعتبار. وقد أثبت أيضًا من خلال معادلته التي تقضي بأن الطاقة = الكتلة × مربع سرعة الضوء، أن الكتلة هي شكل من أشكال الطاقة، أما في نظرية النسبية العامة عن الجاذبية، فقد عمم نظرية نيوتن، حيث الكتلة هي مصدر القوة، من خلال صياغة معادلات ربطت كثافة «الطاقة–الزخم» بانحناء الزمكان.

لاحظ أنني استخدمت لفظة معادلات في صيغة الجمع. يوضح التقوس كيف ينحرف الخط من اتجاه إلى آخر في أي من الأبعاد الأربعة للزمكان، ولكي تتعقب هذا يقتضي الأمر معادلة منفصلة لكل مزيج ممكن من إحداثيات البداية والنهاية.

يتناسب مقدار الانحناء طرديًّا مع كثافة «الطاقة–الزخم»، ومع القوة الفعلية للجاذبية كما عرفها إسحاق نيوتن منذ ثلاثمائة عام، ويتناسب عكسيًّا مع سرعة الضوء مرفوعة للأس أربعة ($1/c^4$). يبدو هذا منطقيًّا؛ فإذا كانت الجاذبية أقوى (أضعف)، فإن

التقوس الناجم عن المقدار المطروح من «الطاقة–الزخم» سيكون أكثر (أقل) قوة، ولو كانت سرعة الضوء c لا نهائية، كما ظن نيوتن، لكانت قيمة $1/c^4$ تساوي صفرًا ولتلاشي الانحناء، وهو ما يعني أن الزمكان مسطح. يتفق هذا مع صورة نيوتن عن الزمكان؛ تلك المنطقة التي تتحرك فيها الأجسام دون أن تؤثر في المكان أو الزمن وحيث الخطوط المتوازية لا تتلاقى أبدًا. على النقيض، يرى أينشتاين أن الكتلة والطاقة تحددان شكل الزمكان. من ثم تتضمن نظرية أينشتاين نظرية نيوتن للجاذبية باعتبارها حالة خاصة؛ فهي تتطابق معها في كون سرعة الضوء لانهائية. يرى أينشتاين أن الإشارات لا تسافر أسرع من سرعة الضوء، وليس للتزامن وجود، في حين رأى نيوتن أن الجاذبية تعمل على نحو فوري، كما لو كانت سرعة الضوء كبيرة إلى حد لانهائي.

في الزمكان المسطح تسير أشعة الضوء في خطوط مستقيمة، وهي طريقة أخرى للقول إنها تسلك أقصر الطرق. في النسبية العامة أيضًا تسلك أشعة الضوء أقصر طريق، وهذه خاصية معروفة في علم البصريات وتنطبق على وسائط مختلفة. إن أقصر «مسار بصري»، ومن ثم أقل عدد من الذبذبات أو أقصر زمن، هو المسئول عن حدوث الانحناء الذي نطلق عليه الانكسار، كما يحدث عندما تبدو العصا الموضوعة في الماء بأي زاوية بخلاف الزاوية القائمة على السطح منحنية. وهذا هو سبب حدوث قوس قزح؛ إذ ينقسم الضوء إلى ألوان مختلفة عندما يصطدم بسطح الهواء أو الماء أو الزجاج كما الحال مع المنشور الزجاجي. يحدث هذا لأن الألوان المختلفة، التي تتوافق مع ترددات أو معدلات ذبذبة مختلفة، كل منها يسعى نحو أقصر مسار بصري مستقل خاص به. ينطبق الأمر عينه على الزمكان بالنسبة للأجسام؛ فالمذنب الذي تجبره الشمس على تغيير مساره يتبع المسار الذي يقلل الزمن الذي سيستغرقه للمرور من الفضاء العميق على جانب النظام الشمسي إلى الجانب الآخر إلى الحد الأدنى.

يفسر المراقب الموجود على سطح الأرض المسار المنحني للمذنب على أنه يرجع إلى قوة جاذبية الشمس. لو كان أينشتاين موجودًا على سطح هذا المذنب، لأصر على أنه في حالة سقوط حر، أي إنه في حالة سكون ومتحرر من أي قوى. وهكذا يتحرك المذنب في مسار كان سيبدو في الزمكان المسطح على شكل خط مستقيم، وهو ما يتوافق مع نظرة نيوتن، لكن في الزمكان المنحني سيتحرك في مسار منحنٍ.

نظريًّا، يمكن للمرء أن يقيس منحنى الزمكان عن طريق عمل مثلث باستخدام ثلاثة أشعة من الضوء. هل سيكون مجموع زوايا المثلث ١٨٠ درجة، أم ستتجاوز هذه

القيمة، أم ستقل عن هذه القيمة التي اعتدناها في الفضاء المسطح؟ في المثال البسيط الخاص بالسقوط نحو مركز الأرض، سيتلاقى شعاعان ضوئيان معًا مثل خطوط الطول، وسيتجاوز مجموع زوايا مثلث الأشعة ١٨٠ درجة؛ عندئذ يُقال إن المكان منحنٍ، لكنه «منحنٍ» في ماذا؟ تذكر أن الإلهام الذي راود أينشتاين في الأساس نبع من سطح الأرض ثنائي الأبعاد، الذي تقوس في بعد ثالث، فالمسارات المتلاقية للمركبات الفضائية أو الأشعة الضوئية تتقوس في أبعاد أعلى، على الأقل من الناحية الرياضية. يمكن القول إن المكان ثلاثي الأبعاد يتقوس داخل البعد الرابع المتمثل في الزمن. في الواقع هذه العبارة مبسطة على نحو مبالغ فيه لأن المكان والزمان متداخلان على نحو نسبي في الزمكان. إن تخيل محتوى الرياضيات الكامل أمر مربك للعقل. غير أننا إذا اخترنا تبني منظور أحد المراقبين قد نبدأ على الأقل في فهم جزء مما يعنيه مفهوم «الانحناء داخل الزمان». ويمكننا البدء في تصور هذا إذا بدأنا بالحالة الأبسط المتمثلة في سفر الضوء عبر الزمكان المسطح، حيث تنعدم الجاذبية.

من الأسس الهامة لنظرية الجاذبية أن الضوء يسافر بسرعة ثابتة على الدوام. غير أنه مع الإسراع ناحية مصدر الضوء أو الابتعاد عنها، يتغير شيء ما: فمثلما يرتفع صوت بوق السيارة أو ينخفض حسب اقتراب السيارة نحوك أو ابتعادها عنك، يتبدل لون (تردد أو «درجة») الضوء، فينزاح الضوء إلى اللون الأحمر عندما يبتعد المصدر بعيدًا عنك، وإلى اللون الأزرق عندما يتجه نحوك، وهي الظاهرة المعروفة باسم «تأثير دوبلر». وما نستقبله على أنه ضوء هو نتيجة الترددات المختلفة التي يمكن أن تتذبذب بها المجالات الكهرومغناطيسية جيئة وذهابًا، حيث التردد هو وسيلة قياس الإيقاع الزمني. عندما يمر الضوء عبر مجالات جاذبية، ينشأ تأثير آخر، وهذا هو مصدر تقوس المكان في تصور أينشتاين.

عندما يمر شعاع ضوء عبر مجال جاذبية الشمس، فإنني سأرى مساره ينحني. فأشعة الضوء التي تسقط نحو مصدر جاذبية، كالشمس أو نجم نيوتروني أو أحد الثقوب السوداء، يتجمع بعضها نحو بعض مثل المركبات الفضائية التي تحدثنا عنها من قبل. بموجب نظرية النسبية العامة، لا تتسبب الحركة وحدها في تغيير لون الأشعة كما يستقبلها المراقب الذي في حالة سكون، وإنما تقوم قوى الجاذبية بهذا أيضًا، إذ يزداد انزياح تردد ذبذبات المجالات الكهرومغناطيسية باطراد إلى اللون الأحمر في مجالات الجاذبية متزايدة القوة. وحين تقترب الأشعة من مصدر الجاذبية، سيجد المراقب

الموجود على مبعدة أنها تزداد انزياحًا نحو اللون الأحمر أكثر فأكثر. إن تردد التذبذبات، أي زمنها الطبيعي، يتباطأ. ولو اقترب شعاع الضوء من حافة ثقب أسود، فسيتباطأ التردد إلى أن يتلاشى؛ بمعنى أن الزمن سيتجمد، حتى إنه من منظور المراقب الموجود على كوكب الأرض سيستغرق شعاع الضوء زمنًا لانهائيًّا كي يدخل إلى الثقب، وذلك مع تزايده في الاحمرار والضعف. بالنسبة لشعاع الضوء نفسه، لا يبدو أن شيئًا ما يحدث له؛ لأنه في حالة سقوط حر. تقترب بقية الأشعة الضوئية الأخرى منه على نحو لصيق للغاية، وفي الواقع تنحني كل المسارات داخل الثقب الأسود على نحو محكم للغاية حتى إن تلك الأشعة المتجهة للخارج لا تعبر الحافة أبدًا؛ فالضوء لا يفلت إلى الخارج أبدًا ويبدو الثقب أسود. تحت تأثير الجاذبية، تتحرك أشعة الضوء بطول الجيوديسيات في كون يتمدد فيه الزمن على نحو مطرد. إن التشوه في بعد الزمن هو الذي يؤدي إلى ظهور انحناء مسارات أبعاد المكان الثلاثة. إذا تمكنت من التوسع في هذه الصورة البسيطة للزمن الممتد، وتصورته وهو يتداخل مع صورة المكان، فلديك إذن خيال أوسع من خيالي. يكفيني أن أقول إن رياضيات معادلات أينشتاين تبقي على صحة الحسابات، في حين أن العمليات الفيزيائية التي تقوم عليها هي عملية تمدد الزمن الذي يحدث إذا ما تلاشى أثر الجاذبية في السقوط الحر.

تمدد الكون

مع أن الفكرة الأساسية يسهل تخيلها بالبداهة، فإن حل معادلات أينشتاين ليس سهلًا، وحتى اليوم بعد مرور قرابة قرن على صياغتها للمرة الأولى، فإنها لا تُحَل إلا في عدد محدود من الحالات. أبسط المعادلات هي المعادلات التي تخلو من الطاقة-الزخم، وهي الحالة التي ينعدم فيها الانحناء: حيث المكان مسطح. ثمة حلول أيضًا يكون فيها الزمكان خاليًا من المادة ومع ذلك غير مسطح. ويخالف هذا التوقعات الساذجة لفلسفات القرون الماضية، يمكن أن يحدث هذا في النسبية العامة بسبب حقيقة أن الإشارات تنتشر بسرعة الضوء الثابتة c، وليس على نحو فوري. إذا وقع شيء تسبب في التغير المفاجئ لتوزيع الطاقة، مثل انفجار مستعر أعظم أو انهيار أحد النجوم مكونًا ثقبًا أسود، فإن موجات الجاذبية سوف تشع نحو الخارج بسرعة الضوء. مجالات الجاذبية نفسها مليئة بالطاقة، ومن شأن التموج المحلي أن يسبب المزيد من تأثيرات الجاذبية على شكل موجات من الطاقة تنتشر نحو الداخل. وإذا أُزيل المصدر المادي الأساسي لموجة الجاذبية، يمكن

أن تستمر الموجة في الانتشار. وهكذا يمكن للمرء أن يتخيل منطقة من الكون خالية من المادة، لكن الزمكان الخاص بها يعج بموجات الجاذبية. وهذا كفيل بوأد فكرة الفراغ الخاوي تمامًا!

تستدعي فكرة «تموجات الزمكان» السؤال عما يعنيه هذا بأي معنى مطلق وكيف يمكن كشف هذه التموجات. مثلما يبث الزلزال موجاته في الأرض، مقلقلًا جيوديسيات الأرض، ستحدث موجات الجاذبية بالمثل تذبذبات في جيوديسيات أي إشعاع من الفوتونات، وفي الفضاء بين ذرات أي أجسام مادية. تشبه تأثيراتها قوى المد والجزر التي تجذب وتدفع أي مادة موجودة إلى أشكال جديدة. مع أنه لا توجد سوى تلميحات غير مباشرة فحسب حتى الآن (كما في مثل النجوم الثنائية النابضة المذكورة من قبل)، فإن العثور على أدلة مباشرة تثبت وجود موجات الجاذبية يتصدر برنامج عمل العلماء. ترتبط أجهزة كشف في مختبرات يبعد بعضها عن بعض آلاف الكيلومترات إلكترونيًّا بغرض إجراء تجربة مترابطة على مستوى هائل تحت مسمى «مرصد التداخل الليزري لموجات الجاذبية». يجري أيضًا ربط أجهزة الكشف الموجودة على الأقمار الصناعية المنتشرة انتشارًا واسعًا في مشروع يحمل اسم «لاقط التداخل الليزري الفضائي». عندما تصدم موجة جاذبية قضيبًا يزيد طوله عن الكيلومتر، ينكمش القضيب قليلًا، ربما بمقدار لا يتجاوز حجم الذرة الواحدة. وبانعكاس أشعة الليزر من خلال مرايا، يمكن الكشف عن التغيرات في المسافة على المستوى الذري. من المنتظر نشوء موجات جاذبية عن النجوم المتصادمة والثقوب السوداء والمستعرات العظمى وغيرها من الأحداث الكارثية، ومن المرجو ليس فقط رصد الموجات وإنما تحديد طبيعة مصادرها أيضًا. بل يأمل العلماء أيضًا في رصد الأصداء الواهية للانفجار العظيم.

بعدما خط أينشتاين معادلاته، أراد أن يرى ما تعنيه بالنسبة للكون، ولعمل ذلك افترض أن الكون متسق في جميع الاتجاهات. وقد أدى هذا إلى استنتاج مذهل: يستحيل أن تظل شبكة زمكان الكون ثابتة متسقة، بل هي قطعًا متغيرة. في الواقع كشفت المعادلات أن قوى الجذب الخاصة بكل أجزاء المادة نسبة إلى بقية الأجزاء الأخرى في كل أنحاء الكون اللانهائي غير مستقرة، فأقل انحراف عن التناظر يؤدي إلى الانهيار. راود أينشتاين حلان ممكنان لهذا التناقض؛ أولهما: أن الكون يتمدد، وهو حل أجازته المعادلات، غير أنه في عام ١٩١٥ كانت النظرة السائدة تقضي بأن الكون ثابت غير متغير، وعليه اتجه أينشتاين إلى الحل الآخر. أجازت معادلاته، علاوة على قانون التربيع العكسي

الشهير للجاذبية، أنه يمكن لقوة الجاذبية أن تحوي مكونًا إضافيًّا تتزايد قوته مع زيادة المسافة على نحو أشبه بالجاذبية المضادة. سيكون مثل هذا التأثير غير جدير بالذكر في ظل الحجم الهائل لمجموعتنا الشمسية أو حتى داخل مجرتنا، لكن في إطار المسافات الشاسعة للغاية بالكون يمكن أن يكون ذا شأن بحيث يعمل على تثبيت الكون. أطلق أينشتاين على هذا «قوة لامبدا» التي يُرمز إليها بالرمز الإغريقي Λ، والمعروفة أيضًا باسم «الثابت الكوني».

حدث في السنوات التالية أمر عجيب؛ أولًا: اتضح أن ظهور لامبدا لم يحل المشكلة؛ إذ إن لامبدا لم تجعل الكون ثابتًا. وصف أينشتاين هذا باعتباره أفدح خطأ ارتكبه في حياته. كان خطأً فنيًّا وإخفاقًا للحدس أيضًا لأنه في خلال سنوات قلائل كشفت ملاحظات إدوين هابل الفلكية أن الكون يحوي مجرات تتحرك مبتعدة بعضها عن بعض. وكلما زاد بعدها عنا، زادت سرعة ابتعادها، وهو ما يتفق مع تصور أن الكون يتمدد. وهذا السلوك هو ما تنبأت به فعليًّا معادلات أينشتاين قبلما يحاول أن يلغيه من خلال تقديم قوة لامبدا. واستكمالًا لمسلسل المفارقات، تقترح الملاحظات الحديثة أن سرعة التمدد تتزايد بالتدريج كما لو أن هناك قوة كونية طاردة تعمل في الخفاء. قد يكون هذا الدليل الأول على أنه توجد حقًّا قوة لامبدا طفيفة.

الأمر يشبه كما لو كان الفضاء كله مليئًا بنوع غريب من الجاذبية المضادة، التي باتت معروفة باسم الطاقة المظلمة. كانت تأثيرات هذه الطاقة غير ظاهرة في الكون المبكر المضغوط، لكن مع تمدد الكون ضعفت قوى الجاذبية بين مجراته التي سارت أكثر تباعدًا من أي وقت مضى، حتى إن تأثيرات طاقة لامبدا الكونية بدأت تسود. يبدو أن هذا الانقلاب في موازين القوى حدث منذ حوالي خمسة مليارات عام.

يوحي المعدل المرصود لتسارع تمدد الكون بأن قوة لامبدا في غاية الصغر، صغيرة أيما صغر حقًّا؛ فمقارنة بمقياس نيوتن لقوة الجاذبية هي أصغر بحوالي $١٠^{١٢٦}$ مرات. (ولكي تتصور حجم ١ إلى جواره ١٢٦ صفرًا، اعلم أن هذا الرقم يتجاوز عدد البروتونات الموجودة في الكون القابل للرصد بأكمله بمليارات الأضعاف). إذا كانت قوة لامبدا كبيرة، شعر المنظرون بشيء من الراحة، ولو لم تكن موجودة على الاطلاق، أي كانت تساوي صفرًا، لتوافق هذا مع فهمنا. لكن حقيقة أن كل متر مكعب من الفضاء مليء بالطاقة المظلمة بمقادير شديدة الضآلة، لكن ليس إلى درجة العدم، هي لغز عميق حول طبيعة الفراغ؛ هي «تكلفة» الفضاء الخاوي.

الفصل السابع

البحر اللانهائي

عالم الكم

في عام ١٦٨٧ وضع إسحاق نيوتن أول قوانين كونية للجاذبية في كتابه «المبادئ». وبحلول منتصف القرن التاسع عشر، كان جيمس كلارك ماكسويل قد دمج أغلب الظواهر الكهربائية والمغناطيسية من خلال نظريته الرائعة عن الكهرومغناطيسية. وعام ١٩٠٠ قال لورد كلفين وويليام طومسون في اجتماع الجمعية البريطانية مؤكدين: «لا يوجد شيء آخر يمكن اكتشافه في الفيزياء.» وفي غضون خمس سنوات كان أينشتاين قد خرج بنظرية النسبية. ومن قبيل المفارقة أيضًا أن ألبرت ميكلسون، الذي ساعدت تجاربه في تشكيل المتناقضات التي أدت إلى رؤية جديدة للعالم أصر أيضًا قائلًا: «لقد ترسخت المبادئ الأساسية العظيمة ترسيخًا مُحكمًا، ويجب البحث عن المزيد من الحقائق في الفيزياء في الخانة السادسة بعد العلامة العشرية.»

تكشف الطبيعة على نحو متكرر عن حدود خيالنا الجمعي. فقد أثبتت اكتشافات النسبية، والذرة النووية، وظهور ميكانيكا الكم إلى أي مدى كان كل من لورد كلفن وميكلسون ساذجين. إن ميكانيكا أينشتاين ونيوتن تصف حركة الأجسام الضخمة بدءًا من المجرات الكاملة ووصولًا إلى التفاحات الساقطة، بل حتى أشعة الضوء، على نحو منقطع النظير. ومن السهل رصد سلوك المجرات على نحو مباشر، بينما كان سلوك الضوء أقل وضوحًا. وقد أصبح اكتشاف أننا نحتاج على المستوى الذري إلى الاستعانة بميكانيكا الكم، وما استتبعه من الكشف عن عالم مخادع من عدم اليقين، الأساس الثاني العظيم للعلم الحديث، وذلك رغم كونه بعيدًا عن المنطق. وسيتضح أنه ستترتب عواقب وخيمة على محاولاتنا لفهم الفراغ. في الواقع، يبدو أن ميكانيكا الكم تقضي بأن أرسطو ربما كان على صواب؛ فالفراغ ليس خاويًا على نحو تام، بل هو يتقد بالنشاط

دائمًا. لذا دعونا نتعرف أولًا على أفكار الكم ثم نحاول فهم كيفية ارتباطها بأفكار نيوتن وأينشتاين.

البشر عمالقة مقارنة بالذرات. وقد تطورت حواسنا بحيث تجعلنا واعين بالعالم المرئي من حولنا. فقد تطورت أعين أسلافنا بحيث تكون حساسة للطيف البصري؛ إذ كانوا بحاجة لرؤية الحيوانات المفترسة المحتملة، ولم يكونوا بحاجة لرؤية النجوم أو الذرات. واقتضت رؤية الذرات مجاهر مخصوصة لم تُصنع إلا في المائة عام الأخيرة وبدأت تكشف عن ظواهر تخالف قوانين الفيزياء المعروفة. فعلى سبيل المثال، بينما ترتد كرات البلياردو بعضها عن بعض بطريقة محددة، فإن أشعة الذرات تتشتت في بعض الاتجاهات أكثر من غيرها، مكونة مناطق كثيفة وأخرى ضحلة، مثل قمم وقيعان موجات المياه المتسربة عبر إحدى الفتحات. ندرك أول ما ندرك ونحن أطفال العالم المرئي، ونبني حدسنا استنادًا إليه. ويُبنى توقعنا التالي حول سلوك الأجسام على هذا الحدس، ومع هذا ففكرة الذرات الشبيهة بالموجات ليست بالفكرة المنطقية إطلاقًا.

لم يكن معروفًا أي شيء عن الذرات في القرن السابع عشر عندما وضع نيوتن قوانين ميكانيكا الأجسام الكبرى، التي صقلها أينشتاين فيما بعد، والتي شكلت البديهيات التي قامت عليها قصتنا حتى الآن. غير أن هذه النظرة إلى الطبيعة نظرة عامة. فبالنسبة للأجسام التي تتكون من أعداد هائلة من الجسيمات الذرية تعد ميكانيكا نيوتن وأينشتاين كافية، لكن ليست أساسية. تتبع الجسيمات المنفردة قواعد أساسية عادة ما تكون غريبة على حواسنا؛ «غريبة» لأن المرء لا يستطيع مثلًا أن يعرف كلًّا من الموضع والحركة الدقيقين للذرات المنفردة في الآن ذاته. لو كانت الذرات المنفردة تملك الوعي، لتطور حدسها من مثل هذه الخبرات، ولكانت هذه هي الطبيعة التي تعرفها، ولسوف تبدو وقتها ... طبيعية. غير أن الوعي الذاتي يتضمن عددًا كبيرًا من الذرات. وعندما تصير أعداد كبيرة من الذرات منظمة، يمكن أن تبزغ أنماط منتظمة بسيطة تمنح المجموعة ككل خصائص لا تملكها الذرات المنفردة أو الأعداد الصغيرة منها. لعل الوعي البشري أحد الأمثلة على هذه الخصائص، وتتضمن الأمثلة الأخرى خاصية مغناطيسية المعادن والموصلية الفائقة التي تنشأ في المجموعات الكبيرة للذرات لكن لا تتمتع بها الذرات المنفردة، والأطوار الصلبة والسائلة والغازية للمادة، كما في الجليد والماء والبخار، والتي تنشأ من الطرق المختلفة التي تنتظم بها الذرات أو الجزيئات نفسها (سنوضح هذه الأفكار بالتفصيل في الفصل الثامن عندما نتعرض لفكرة التحولات الطورية ونتأمل

هل يوجد فراغ فريد أم لا). في مثل هذه المواقف، يبزغ من السلوك الأساسي الجوهري تسلسل هرمي من القوانين الفيزيائية.

قدم روبرت لافلين في كتابه «كون مختلف» وصفًا شاملًا للظواهر الثانوية في الفيزياء. ويشدد على وجه الخصوص على فكرة أن قوانين نيوتن هي قوانين وصفية وليست جوهرية، وأن الصعوبات التي نواجهها في فهم الظواهر الكمية ترجع إلى محاولة تفسيرها في ضوء نظريات نيوتن، في حين أنه أولى بنا أن نقبل نظريات نيوتن على أنها نظريات منبثقة من نظرية الكم.

يرجع سبب قدرة العلم على التنبؤ — مع أن المعادلات الأساسية قد لا تكون معروفة، أو حتى يستحيل حلها إذا كانت معروفة — إلى أنه ليست الذرات والجزيئات وحدها هي التي تُقدِّر التنظيم؛ فالقوانين التي تعمل على مستوى الذرات المنفردة تنتظم في قوانين جديدة كلما ارتقينا إلى الأنظمة المعقدة. إن المعادلات الأساسية التي تحكم الذرات المنفردة معروفة، لكن يستحيل حلها إلا في حالات معدودة بسيطة فحسب، ويكاد يكون اشتقاق المواد الصلبة والسائلة مستحيلًا. لكن هذا لم يمنع المهندسين من تصميم بنى صلبة أو أنظمة هيدروليكية. إن قوانين الشحنات الكهربائية تؤدي إلى ظهور قوانين الديناميكا الحرارية والكيمياء، التي تقود بدورها إلى ظهور قوانين الصلابة ثم قوانين الهندسة. قد يتعذر اشتقاق الحالة السائلة لهذه المادة أو تلك من القوانين الأولى، لكن تظل هناك خصائص عامة تتمتع بها السوائل تتجاوز هذه القوانين. لن تتحمل السوائل اختلافات الضغط من نقطة إلى أخرى بخلاف تلك الناشئة عن الجاذبية، وهذا هو المبدأ الكامن وراء البارومتر الزئبقي وكل الآلات الهيدروليكية. هذه خاصية من خصائص الحالة السائلة المنظمة، وليس للقوانين الأساسية المفصلة على المستوى الذري أهمية كبيرة في هذا المقام. وهي السبب في حدوث الظواهر التي قادت كلًّا من جاليلو وتورشيلي إلى اكتشافاتهما حول السوائل والفراغ، والتي بدأنا بها رحلتنا.

هذا التسلسل الهرمي للبنى والقوانين هو ما يمكننا من فهم العالم ووصفه؛ فالطبقات الخارجية تعتمد على الطبقات الداخلية، ومع ذلك فلكل منهما هويته، وعادة ما يمكن التعامل مع الواحدة بمعزل عن الأخرى. وهكذا يستطيع المهندس أن يصمم جسرًا دون الحاجة إلى الاستعانة بالفيزياء الذرية التي تقوم عليها قوانين الضغط والتوتر.

تعتمد جميع صور الهندسة والتكنولوجيا على قوانين نيوتن للحركة، التي تقضي بأن الأشياء تتحرك بسرعة ثابتة ما لم تُجبَر على تغيير حركتها، وأن مقدار القوة عينه

يسبب تسارع الجسم الثقيل بقدر أقل مما يسارع الجسم الخفيف، وأن العجلة تحدث في نفس اتجاه القوة المسببة لها. وعلى مدار ثلاثمائة عام من التجريب الدقيق كانت إخفاقاتها الوحيدة عندما طُبقت على الأجسام المتحركة بسرعة تقارب سرعة الضوء، ولذلك فهي متضمنة في نظرية النسبية لأينشتاين، أما على مقاييس الطول الذرية فتحل محلها قوانين ميكانيكا الكم.

ترتبط تجاربنا المباشرة بالمادة في صورتها المكثفة، إذ إن حواسنا لا تعي وجود الذرات، لكن دلالات الحركة المحمومة للهندسة الذرية تحيط بنا في كل الأرجاء. فأنا أشاهد النبات ينمو ولا أرى ذرات الكربون والأكسجين وهي تُنتزع من الهواء وتتحول إلى أوراق، وطعام الإفطار المكون من الحبوب الذي أتناوله يتحول على نحو غامض إلى جزء مني بفضل إعادة ترتيب جزيئاته. في جميع الأحوال تملك الذرات زمام الأمور، ونحن — الكائنات الضخمة الثقيلة — لا نرى سوى المنتج النهائي الكبير. لا تنطبق قوانين نيوتن إلا على سلوك المادة في صورتها المكثفة.

بعد نيوتن بمائتي عام تطورت التقنيات التجريبية إلى درجة بدأت معها الهندسة الذرية في أن تُدرك. ومع مطلع القرن العشرين بدأت تتراكم حقائق تجريبية غريبة متعددة بشأن الجسيمات الذرية، وقد بدت متعارضة مع عمل نيوتن المحكم الدقيق، مثل السلوك الموجي للذرات المذكور سابقًا. وإذا ما حاولنا وصف هذه الغرابة باستخدام لغة نيوتن المألوفة، فسوف نخفق.

حل هذه الأحجية يوجد في «دراسة حالة رائعة حول كيفية تطور العلم من خلال صياغة نظريات تتوافق مع الحقائق وليس العكس». اكتُشفت قوانين ميكانيكا الكم، ميكانيكا الأشياء شديدة الصغر، في عشرينيات القرن العشرين. تعمل ميكانيكا الكم بنجاح؛ إذ وصلت دقة توقعاتها في بعض الحالات إلى أجزاء من المليار. ومع ذلك فهي تتسبب في ظهور تناقضات محيرة، وبعض المحتالين يستغلون هذا لإقناع العامة أن العلماء يفكرون جديًّا في أكوان موازية لا يزال إلفيس بريسلي يعيش بها، أو يعتقدون أن التواصل بالتخاطر ممكن.

إحدى التناقضات الظاهرة التي تهمنا هنا هي أنه بعد التخلص من المادة والمجالات وكل شيء من أجل الوصول إلى العدم، فإن الفراغ الناتج على نطاق واسع هو أيضًا تأثير تراكمي. فعندما يُرى الفراغ على المستويات الذرية نجده يعج بالنشاط والطاقة والجسيمات.

الموجات وعدم اليقين الكمي

ميكانيكا الكم كلها مبنية على خاصية أساسية واحدة للطبيعة: هي أنه يستحيل قياس كل من موضع الجسيم وزخمه بدقة تامة. فإذا عرفت الموضع تمام المعرفة، فأنت إذن لا تعرف شيئًا البتة عن زخمه، والعكس صحيح. لكن إجمالًا هناك حل وسط. فإذا كان معروفًا أن موضع جسيم ما يقع داخل نطاق مسافة قدرها r من نقطة ما، فلا بد إذن أن يكون زخمه غير معروف على الأقل بالمقدار p حيث:

$$p \times r \sim \hbar$$

و$\hbar$ هي ثابت الطبيعة الذي يُعرف باسم «ثابت بلانك» (مقسومًا فعليًّا على 2π). تنُطق $\hbar$ «إتش بار»، ومقدارها هو ($\hbar = 1.05 \times 10^{-34}\,\text{Js} = 6.6 \times 10^{-22}\,\text{MeVs}$) وهذا المقدار غاية في الصغر لدرجة يستحيل معها مقارنته بالأشياء المرئية، لكن فيما يخص الذرات ومكوناتها فهو الذي يحكم سلوكها.

ثمة عدم يقين مشابه بخصوص الزمن والطاقة (ذكرت سابقًا أن ميكانيكا الكم مبنية على خاصية أساسية «واحدة» لأن عدم اليقين بشأن الموضع والزخم يقابله في الزمكان عدم اليقين بشأن الزمن والطاقة). يعني هذا أن مبدأ حفظ الطاقة يمكن «انتهاكه» على مدار مقاييس زمنية قصيرة للغاية. وضعت كلمة «انتهاك» بين علامتي اقتباس لأنه من المستحيل أن يلاحظه المرء؛ فهذا هو لب عدم القدرة على تحديد الطاقة «على وجه الدقة» في أي وقت بعينه. يمكن للجسيمات أن تشع طاقة (على شكل فوتونات على سبيل المثال) في انتهاك ظاهر لمبدأ حفظ الطاقة، ما دامت جسيمات أخرى تعيد امتصاص هذه الطاقة على مدار فترة زمنية قصيرة. وكلما أُفرط في السحب من رصيد الطاقة قصر الزمن الذي لا بد أن تُسترد الطاقة فيه؛ فكلما سحبت على المكشوف من حسابك البنكي زاد احتمال أن يلاحظ البنك ذلك بسرعة، وتعين عليك أن تسدد المال قبل أن يُكتشف الأمر وبهذا يكون الكل راضيًا. يلعب هذا الانتهاك «الافتراضي» لمبدأ حفظ الطاقة دورًا مهمًّا في نقل القوى بين الجسيمات. في الصورة الكمية للمجال الكهرومغناطيسي، يكون هذا الانتقال على صورة فوتونات افتراضية، أو حزم كمية، أو «جسيمات» ضوئية، تطير عبر الزمكان وتنقل القوى إلى الأجسام البعيدة.

لاحظ كيف استخدمت كلمة «فوتونات» باعتبارها «جسيمات» ضوئية هنا. أليس الضوء موجة؟ ترجع الطبيعة المزدوجة للضوء بوصفه موجة أو جسيمًا إلى إسحاق

نيوتن. تعمل أشعة الضوء كما لو كانت مكونة من تيارات من الجسيمات؛ فهي تنتقل في خطوط مستقيمة، وتترك ظلالًا حادة، وتنحرف عند التقائها بأوساط مختلفة كما يحدث عند التقائها بالهواء والزجاج، طبقًا لقواعد البصريات الهندسية التقليدية. ومع ذلك يظهر الضوء أيضًا خصائص شبيهة بخصائص الموجات؛ فحواف الظلال غير حادة، وحين يتشتت الضوء عبر ثقوب صغيرة يمكن أن تظهر حزمًا معتمة وأخرى مضيئة تُعرف ب «هدب التداخل». إن الحقيقة القائلة إنه يمكن في ظل ظروف معينة لشعاعين متداخلين من الضوء أن يلغي أحدهما الآخر بحيث ينتج ظلام يمكن أن يسهل فهمها إذا تعاملنا مع الضوء بوصفه موجة؛ فعندما تتزامن قمتان تكون هناك قمة كبيرة، أو سطوع شديد، لكن عندما تلتقي قمة وقاع فإن أحدهما يلغي الآخر فيكون ظلام.

في عام ١٩٠٠ أثبت ماكس بلانك أن الضوء ينبعث في «حزم» أو «كموم» ميكروسكوبية منفصلة من الطاقة تعرف بالفوتونات، وفي عام ١٩٠٥ أثبت أينشتاين أن الضوء يظل على صورة الحزم هذه وهو ينتقل عبر الفضاء. وقد قدم بلانك في نظريته حول كموم الطاقة «ثابت بلانك» الذي يحمل اسمه، والذي يشار له بالرمز h (أما $h/2\pi$ فيشار إليه بالرمز $\hbar$). وكانت هذه بداية نظرية الكم وكان سبب نجاحها الفوري هو تفسيرها للكيفية التي توجد بها الذرات.

على ما يبدو يدور الإلكترون داخل ذرة الهيدروجين حول البروتون المركزي بسرعة ١ / ١٣٧ من سرعة الضوء. ويعني دورانه في مدار طوله ١٠$^{-٩}$ أمتار بسرعة حوالي ألف كيلومتر في الثانية أنه يقطع نحو مليون المليار لفة في الثانية. طبقًا لنظرية ماكسويل، ينبغي أن يبث مثل هذا الإلكترون إشعاعًا كهرومغناطيسيًّا على الفور، بحيث إنه في اللحظة التي تتكون فيها هذه الذرة يسقط الإلكترون للتو في حركة حلزونية نحو النواة ليتلاشيا في وهج من الضوء. كيف إذن توجد الذرات؟ كان اكتشاف أن الطاقة المشعة هي طاقة كمية هو الذي قاد نيلز بور إلى أن يقترح أن طاقات الإلكترونات داخل الذرات كمية هي أيضًا؛ فلا يمكنها أن تملك سوى طاقات محددة. ولمَّا كانت الإلكترونات محصورة في حالات الطاقة المحددة هذه، فإنها لا تبث الطاقة باستمرار ولا تسقط حلزونيًّا نحو النواة. وإنما يمكنها فقط أن تقفز من إحدى حالات الطاقة إلى أخرى، وتشع الطاقة أو تمتصها كي تحفظ إجمالي مقدار الطاقة ثابتًا (عبر فترات زمنية طويلة تُحفظ الطاقة). وبمجرد أن تصير الإلكترونات في حالة الطاقة الدنيا، لن يكون لديها مكان أدنى لتذهب إليه، ومن ثم تظل هناك مكونة ذرة مستقرة. قد تظن أن هذا الحل غير واقعي؛ إذ إنه

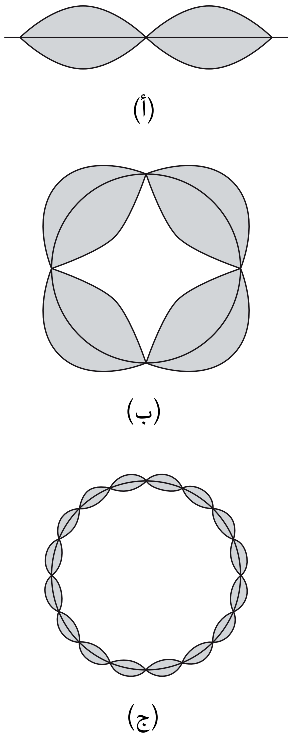
يقضي بأن الذرة تصير مستقرة لأنها مستقرة. غير أننا إذا تقبلنا مفهوم الموجة فمن الممكن أن نتخيل السبب.

اقترح بور أن ثابت بلانك h يحكم الطاقات المسموح بها للإلكترون الذي يدور داخل الذرة. في الصورة الحديثة، ليس الضوء وحده فحسب وإنما الإلكترون أيضًا يتمتع بخصائص أشبه بالموجات، ويرتبط طوله الموجي وزخمه بنفس الكمية h. الآن طبق هذه الفكرة على ذرة الهيدروجين، أبسط ذرة، التي تملك إلكترونًا واحدًا فحسب. تلغي موجات الإلكترون بعضها بعضًا وتتبدد في أي مسارات لا «تتوافق» فيها. هذا موضح في الشكل ٧-١. في الجزء (أ) نرى إلكترونًا يتحرك بطول المسار، وهو يمثل على شكل موجة. الآن تخيل الطول الموجي الكامل وقد أخذ شكل دائرة. عندما تناسب الموجة الدائرة بالضبط، يكون هذا أول مدار ممكن، وإذا لم تتناسب الموجات على هذا النحو فإنها تتلاشى. يكوِّن الطولان الموجيان اللذان يكملان الدائرة كما في الشكل ٧-١ (ب) مدار بور الثاني الذي يتمتع بطاقة أعلى من المدار الأول، وتتوافق المدارات ذات الطاقة الأعلى مع عدد أكبر من الأطوال الموجية الموجودة في محيط الدائرة (شكل ٧-١ (ج)). واللافت للنظر أن هذه الصورة المبسطة تتطابق مع ما نعرفه عن الذرات.

لا تنبعث أي طاقة عندما يظل الإلكترون في مداره، لكن الطاقة تنبعث إذا قفز الإلكترون من حالة أعلى من الطاقة إلى حالة أدنى. وبافتراض أن هذه الطاقة المنبعثة حُولت إلى ضوء، حسب بور الأطوال الموجية المرتبطة ووجد أنها تتوافق بالتمام مع طيف الهيدروجين الغامض. وهكذا فإن نظرية الكم لبلانك، التي انطبقت بنجاح على الإشعاع عندما افترض أينشتاين وجود الفوتون، انطبقت بنجاح مماثل على المادة على يد بور.

من الملامح الجوهرية لهذا أن نظرية الكم باتت تقضي بأن ثنائية الموجة–الجسيم هي خاصية لكل صور المادة؛ فالإلكترون الذي نفكر فيه على أنه جسيم، هو فعليًّا حزمة كمية من «مجال إلكتروني» يملك خصائص تشبه الخصائص الموجية. وبقدر ما يبدو هذا غريبًا، فهذه هي الحقيقة: إذ تعتمد المجاهر الإلكترونية على هذه الخاصية شبه الموجية للإلكترونات.

ما هذه الموجات؟ وكيف ترتبط بمبدأ عدم اليقين الذي تناولناه سابقًا؟ أزعجت أسئلة كهذه العلماء أيما إزعاج منذ بزوغ نظرية الكم. استفاض كل من أينشتاين وبور، ضمن كثيرين، في مناقشة معنى نظرية الكم، لذا أستميحكم عذرًا في الاعتراف بأنني لا أملك إجابات لها. إليكم رؤيتي عن الأمر، وإذا وجدت أنك تفضل تفسيرًا آخر فلا بأس؛ فليس هناك أي تفسير «رسمي» متفق عليه بشأنها.



شكل ٧-١: موجات الإلكترونات في نموذج بور الذري.

على المستوى المبدئي، على المرء أن يقبل فحسب بمبدأ عدم اليقين وتبعاته. غير أن الأمر يكون أكثر راحة دائمًا عندما نستطيع أن نبني نموذجًا فكريًّا يجسد خصائص النظرية، لأننا عندئذ نستطيع أن ننمي حدسنا بشأن سلوكها وتبعاتها. يمكن تشبيه عدم اليقين الخاص بالموضع والزخم بشيء نألفه؛ ارسم الكثير من النقاط بحيث تكوِّن شكل موجة لها طول موجي ثابت؛ عندئذ إذا حددنا الموضع باعتباره مكان نقطة معينة في الموجة والزخم باعتباره الطول الموجي؛ يصير لدينا تشبيه جيد لمبدأ عدم اليقين على أرض الواقع. طبقًا لميكانيكا الكم، كلما زاد الزخم قصر الطول الموجي. افترض أنني أعرف الموضع بالضبط سيكون إذن كل ما لدي هو نقطة واحدة، وسيكون من المستحيل

معرفة مقدار الطول الموجي؛ فمن الممكن أن يكون بأي قيمة تريدها. وإذا كان لدي عدد قليل من النقاط يشكل بداية موجة، عندئذ سأبدأ في اكتشاف هل الطول الموجي طويل أم قصير، وفقط بعدما يكون لدي طول موجي كامل، سأتمكن من أن أحدد بكل يقين مقدار قيمته. غير أن ثمن هذا اليقين حيال معرفة الطول الموجي سيكون التخلي عن معرفة الموضع المحدد على امتداد الطول الموجي بأي درجة من الدقة. يتحقق هذا حسابيًّا من خلال تحليل فورييه، وهو تمثيل أي انحناء، أو حتى ارتفاع حاد، على صورة تراكب لموجات ذات أطوال موجية مختلفة. يساوي الارتفاع المنفرد في موضع محدد مجموع عدد لانهائي من الموجات ذات الأطوال الموجية المختلفة.

نرى هنا نوعًا من التناقض في القول إننا نحاول تحديد موضع إحدى الموجات؛ إذ إن الموجة لا تصبح موجة معروفة إلا عندما نقيس طولها الموجي الكامل. إذا أقنعك هذا المثال بالقبول بأن ثمة مواقف أخرى يستحيل فيها تحديد الموضع وخاصية أخرى بدقة على نحو ذي مغزى، فأنت في طريقك لفهم طبيعة عالم الكم. إن تمتع الموجات بمثل هذه الخصائص يجعلها مفيدة للغاية باعتبارها نماذج فكرية تعبر عما يحدث في الواقع. غير أنها في رأيي لا تتجاوز هذا؛ مجرد نماذج فكرية.

فراغ محموم

تخيل منطقة من الفراغ، على سبيل المثال متر مكعب في الفضاء الخارجي أُزيل منه كل الهيدروجين والجسيمات الأخرى. هل يمكن أن يكون خاليًا حقًّا من المادة والطاقة؟ في الكون الكمي، الإجابة هي لا.

إن امتلاك معلومة دقيقة تقضي بأنه لا وجود لأي جسيم في كل نقطة، يعني بالتبعية أننا لا نعرف شيئًا عن الحركة ومن ثم الطاقة. قد تزيل كل المادة والكتلة، لكن عدم اليقين الكمي يقضي بأنه توجد طاقة؛ إذ يستحيل أن تنعدم الطاقة أيضًا. أما التأكيد على أن هناك فراغًا لا يحتوي على مادة أو كتلة أو طاقة فينتهك مبدأ عدم اليقين. يوجد حد أدنى يُعرف بـ «طاقة نقطة الصفر»، لكن هذا هو أفضل ما يمكنك فعله. ومن الممكن تصور هذا من خلال التفكير في بندول يتكون من عدد قليل من الذرات.

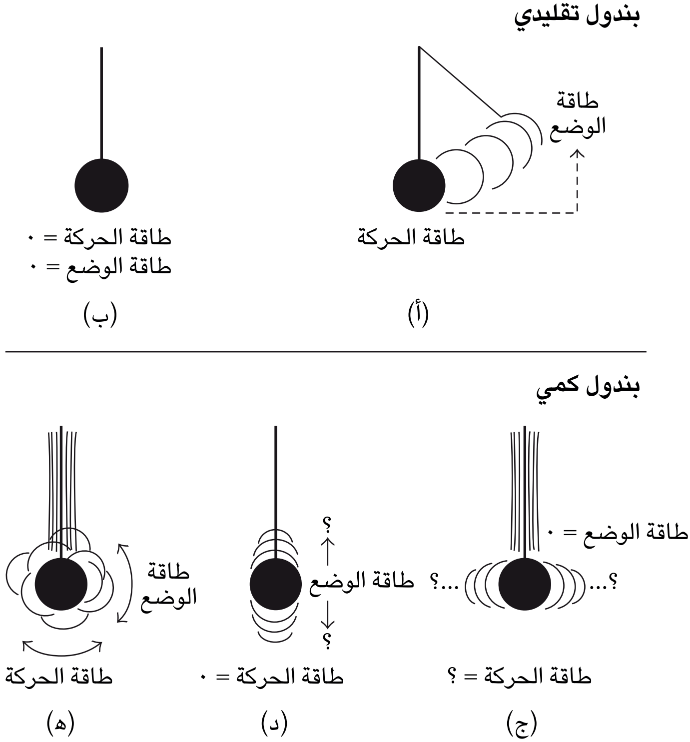
يمكن تحديد السرعة المحددة لجسيم ما فقط إذا كان موضعه غير معروف. يعني هذا أن أي تجمع صغير من الجزيئات المعلقة في خيط من الذرات تتأرجح كالبندول يستحيل أن يسكن سكونًا تامًّا أبدًا، بحيث يتدلى رأسيًّا وتكون كرة الجزيئات ساكنة

عند أدنى ارتفاع، أي عند «نقطة الصفر». بدلًا من هذا يقضي عدم اليقين الكمي أنها لا بد أن تتمايل ميلًا خفيفًا حول هذا الموضع. تُسمى هذه الظاهرة حركة نقطة الصفر.

بينما تتأرجح الجزيئات تحت تأثير الجاذبية، كلما ارتفعت عن نقطة الصفر، زادت طاقة الوضع الخاصة بها. عند قمة التأرجح تبلغ طاقة الوضع للبندول المرئي ذروتها، وتكون طاقة الحركة صفرًا، وعلى العكس، تبلغ طاقة الوضع عند قاع التأرجح صفرًا وتبلغ طاقة الحركة ذروتها. في حالة البندول الكمي «النانومتري» تكون الأمور أدق. فإذا خفضنا طاقة الوضع إلى حدها الأدنى من خلال تثبيت كرة البندول عند ارتفاع صفر، فإن حالتها الحركية ومن ثم طاقتها الحركية تصبح غير محددة. وعلى العكس، قلل طاقة الحركة من خلال إيقاف البندول، فيصبح ارتفاعه فوق الصفر غير معروف. تقضي ميكانيكا الكم بأن ثمة حدًّا أدنى من طاقتي الحركة والوضع يمكن الوصول إليهما؛ إذ يستحيل أن تكون قيمتهما في الآن ذاته صفرًا. وهذا الحد الأدنى هو طاقة نقطة الصفر للتجمع الذري.

بالنسبة للبندول المرئي، مثل ذلك الموجود في الساعات القديمة، تكون طاقة نقطة الصفر صغيرة للغاية إلى درجة تجعلها غير ملحوظة. غير أنه بالنسبة للتجمعات المكونة من أعداد قليلة من الذرات والجزيئات، فإن هذه الطاقة الدنيا قابلة للمقارنة بالطاقات الإجمالية لتلك المجموعات من الجسيمات نفسها. عندئذ تتجسد طاقة نقطة الصفر من خلال الحركة، على سبيل المثال حركة الذرات داخل الجزيئات وحركة الجزيئات المنفردة داخل تجمع الجزيئات الكلي. وهكذا في الوقت الذي تسبب فيه حركة الجزيئات داخل المادة حدوث ما نسميه حرارة، فإنه كلما ارتفعت الحرارة اهتاجت حركة الجزيئات، وتقضي نظرية الكم بأنه ستظل هناك طاقة نقطة صفر جوهرية حتى فيما يصل المرء إلى درجة حرارة الصفر المطلق، والبالغة −٢٧٣ درجة مئوية، والمسماة بدرجة الصفر الكلفينية. ومن الآثار المترتبة على ذلك أنه من المستحيل الوصول إلى درجة الصفر المطلق التي يكون فيها كل شيء ساكنًا ودون زخم أو طاقة.

الأمر الجدير بالذكر هو أن هذا ينطبق على أي حجم محدود من الفضاء، حتى لو لم توجد فيه مادة. يترتب على هذا أن أي منطقة محدودة من الفضاء الخالي — «الخالي» بمعنى أن كل صور المادة أُزيلت منه — ستكون مملوءة بالطاقة. فجميع المساحات المحدودة من أي حجم هي عرضة لتذبذبات الطاقة. بالنسبة للمساحات المرئية، يكون التأثير غاية في الصغر لدرجة تجعله لا يُلاحَظ، أما في المساحات شديدة الصغر، فتذبذبات الطاقة تكون هائلة.



شكل ٧-٢: (أ) يبدأ البندول عاليًا في حالة سكون: تكون طاقة الوضع كبيرة، وتكون طاقة الحركة منعدمة. تسبب قوة الجاذبية تأرجحه إلى الأسفل، وصولًا إلى أدنى نقطة تنعدم فيها طاقة الوضع، وتكون طاقة الحركة في أشد درجاتها. خلال عملية التأرجح يكون مجموع طاقة الحركة وطاقة الوضع ثابتًا. (ب) من الممكن تعليق البندول رأسيًّا في حالة سكون. تكون طاقة الوضع منعدمة، تمامًا مثل طاقة الحركة. ومن ثم يكون مجموع الطاقتين صفرًا. (ج) مع البندول الكمي ليس بالإمكان أن تبلغ طاقة الوضع وطاقة الحركة صفرًا في الوقت عينه. عندما يتدلى البندول في أدنى نقطة، حيث تكون طاقة الوضع صفرًا، تكون حركته غير محددة، ومن ثم تكون طاقة الحركة الخاصة به غير معروفة. هذه هي «حركة نقطة الصفر». (د) وعلى العكس، إذا كان البندول ساكنًا وطاقة الحركة لديه تساوي صفرًا، فسيكون موضعه، ومن ثم طاقة الوضع الخاصة به، غير محددة. (ه) هناك حد أدنى إجمالي لطاقتي الحركة والوضع يعرف باسم طاقة نقطة الصفر.

مثلما يستطيع شعاعا ضوء أن يلغي أحدهما الآخر إلى الصفر نتيجة خصائصهما شبه الموجية، يستطيع الصفر أن يتحول إلى شيئين متعادلين. قد لا يحتوي الفراغ على مجالات كهرومغناطيسية إجمالًا، لكن التذبذبات التي تحفزها ظاهرة نقطة الصفر موجودة دائمًا، وهو ما يترتب عليه عدم وجود شيء من قبيل الفراغ الخاوي فعليًّا. فمن وجهة النظر المعاصرة، الفراغ هو حالة تكون فيها الطاقة عند أدنى قدر ممكن؛ أي الحالة التي يستحيل أن نزيل منها المزيد من الطاقة. باللغة العلمية تُسمى هذه الحالة من الفراغ «الحالة القاعية». في قوانين الطبيعة تكمن حالات مثيرة، فيها تتطابق كثافات الطاقة مع جسيم أو جسيمين أو حتى مليارات الجسيمات المادية أو الإشعاع. بإمكانك أن تزيل كل هذه الجسيمات الحقيقية إلى أن تصل للحالة القاعية، غير أن التذبذبات الكمية ستظل باقية. يشبه الفراغ الكمي الوسط، وحسب معرفتنا بالحالات القاعية في الأنظمة المرئية، يمكن توقع المزيد من المفاجآت بالنسبة لخصائص الفراغ الكمي، كما سنرى في الفصل الثامن.

نحتاج أولًا إلى أن نقتنع بأن طاقة نقطة الصفر حقيقية، وليست مجرد حيلة رياضية. اقترح هندريك كازيمير في عام ١٩٤٨ نتيجة فيزيائية مترتبة عليها، وبعد سنوات من المحاولات، أثبتنا أخيرًا ذلك بالتجربة العملية في عام ١٩٩٦.

الفراغ بحر كمي من موجات نقطة الصفر، بكل الأطوال الموجية الممكنة، بدءًا من تلك التي تكون أصغر حتى من المقياس الذري، ووصولًا إلى تلك الهائلة بحق. الآن، ضع لوحين معدنيين، منفصلين قليلًا بحيث يوازي أحدهما الآخر في الفراغ. تبدأ قوة ضئيلة لكن يمكن قياسها في جذبهما أحدهما نحو الآخر. بالطبع هناك قوة جذب متبادلة بين اللوحين، لكنها غير جديرة بالذكر على مقياس «تأثير كازيمير»، الذي ينتج عن الطريقة التي يخلخل بها اللوحين الموجات التي تملأ الفراغ الكمي.

توصل المعادن الكهرباء، وهذا يؤثر على أي موجات كهرومغناطيسية في طاقة نقطة الصفر الموجودة في الفراغ. تقضي نظرية الكم بأنه بين اللوحين، فقط الموجات ذات الأطوال الموجية المقدرة قيمها بأعداد صحيحة تامة هي التي تستطيع أن توجد. فعلى غرار وتر الكمان الذي يهتز بين طرفيه الثابتين فيصدر صوتًا ونغمات موسيقية، وحدها النغمات التي «تتناغم» مع الفجوة بين اللوحين يمكنها أن «تهتز»، في حين أنه خارج اللوحين يمكن أن توجد كل الأطوال الموجية الممكنة. وعليه، ثمة بعض الأمواج «المفقودة» بين اللوحين، وهو ما يعني أن الضغط المبذول على الجانبين الداخليين من اللوحين أقل

من الضغط المبذول على الجانبين الخارجيين، ويؤدي هذا لوجود قوة إجمالية تضغط اللوحين أحدهما نحو الآخر. تتنبأ ميكانيكا الكم بالمقدار الذي ينبغي أن تكون عليه هذه القوة. إذ يتناسب مقدارها طرديًّا مع كم بلانك (نظرًا لأنها تأثير كمي)، ومع سرعة الموجات الكهرومغناطيسية، ويتناسب تناسبًا عكسيًّا مع المسافة d بين اللوحين مرفوعة إلى القوة الرابعة، أي d^4. يعني هذا أن القوة تتلاشى عندما يتباعد اللوحان، وهو ما يبدو منطقيًّا لأننا في حالة الانفصال التام سنعود مجددًا إلى حالة الفراغ اللانهائي الخالية من أي تأثير. وعلى العكس، تصير القوة أكبر عندما يقترب اللوحان بشدة، وفي مثل هذه الظروف من الممكن قياس هذه القوة، وبذا نتحقق من كل من مقدار القوة وتفاوت المسافة الفاصلة بينهما.

وهكذا جرى قياس القوة، وتأكيد التأثير، وإثبات مبدأ طاقة نقطة الصفر في الفراغ. يثبت «تأثير كازيمير» أن «التغيير» في طاقة نقطة الصفر هو كمية حقيقية يمكن قياسها، مع أن طاقة نقطة الصفر نفسها لا يمكن قياسها. إن مقدار طاقة نقطة الصفر غير محدد فعليًّا، وأدى التأويل المغلوط للنظرية إلى مقترحات على غرار ذلك الذي طرحته مجلة «إنفينيت إينرجي» قائلة إن هذا مصدر للطاقة لم يلق له العلم بالًا ويمكن استغلاله في عملية الاندماج البارد وما شابه. لكن طاقة نقطة الصفر ليست كذلك. إنها ببساطة الحد الأدنى من الطاقة الذي يمكن أن يوجد في أي نظام، أو فراغ.

حركة نقطة الصفر الخاصة بالمجالات الكهرومغناطيسية موجودة على الدوام في الفراغ. ويستحيل استخلاص طاقة نقطة الصفر أو استخدامها كطاقة؛ فالطاقة تكون في أقل صورها داخل الفراغ فعليًّا. ومع ذلك يمكن الشعور بتأثيرات حركة نقطة الصفر من خلال الجسيمات التي تمر عبر الفراغ.

يتذبذب الإلكترون إبان حركته تذبذبًا خفيفًا لأنه يشعر بحركة نقطة الصفر الخاصة بالمجالات الكهرومغناطيسية الفارغة. وللكشف عن هذا نحتاج مرجعية قابلة للقياس، ويعد الإلكترون الحبيس داخل ذرة الهيدروجين دليلًا كافيًا على أن الفراغ ليس خاويًا بالمرة. يتحرك إلكترون داخل ذرة الهيدروجين بسرعة تبلغ نحو واحد بالمائة من سرعة الضوء. يكشف مطياف الهيدروجين التغيرات الحادثة في الطاقة وتقفز الإلكترونات بين المدارات المختلفة في الذرات. وتتجسد اختلافات الطاقة بين المستويات المتعددة على صورة طاقة الضوء التي تظهر في خطوط الطيف.

مكن التطور في تقنيات الرادار إبان الحرب العالمية الثانية علماء الفيزياء في فترة ما بعد الحرب من قياس طاقات الطيف، والاستدلال على الإلكترونات، بدرجة من الدقة

تزيد على الجزء من المليون. أدى هذا إلى اكتشاف «إزاحة لامب»، والمسماة على اسم ويليام لامب، أول من قاسها في عام ١٩٤٧، وهذه الإزاحة الطفيفة مقارنة بما توقعته ميكانيكا الكم إذا كان الفراغ خاويًا بحق تتفق اتفاقًا تامًّا مع الحسابات التي تتضمن تأثيرات التذبذبات في فراغ كمي يعج بالنشاط.

تخبرنا ميكانيكا الكم على نحو دقيق بشأن الظواهر التي تحدث على المستوى دون الذري، وهي تفعل هذا في الوقت الذي تتجاهل فيه تأثيرات الجاذبية. لم ينجح أحد في الجمع بين الدعامتين العظيمتين لفيزياء القرن العشرين — نظرية الكم والجاذبية العامة — في نظرية موحدة متوافقة حسابيًّا ومختبرة تجريبيًّا. من الناحية العملية، يتحاشى العلماء هذا لأن كلتا النظريتين مثاليتان كل واحدة في المجال الخاص بها. لكن بعد انقضاء ١٠^{−٤٣} ثوانٍ على الانفجار العظيم، كان الكون في غاية الصغر وكانت الجاذبية مسيطرة على كل شيء، ومن ثم خضعت تلك الفترة لسيطرة نظرية الجاذبية الكمية. يظل الكشف عن كنه هذه النظرية أحد التحديات الرئيسية التي لم يُسبر غورها في الفيزياء الرياضية. ومع ذلك، يمكننا أن نقدر التبعات العميقة التي ستخلفها على بعض من المشكلات التي تحتاج لحل. على سبيل المثال، تقر خبرتنا بأن أبعاد المكان والزمان مختلفة على نحو ما، على الأقل من حيث قدرتنا على التحرك عبرها أو استقبال المعلومات أو معالجتها. وفي حين أن هذا الفرق الضئيل حقيقي كما ندركه بحواسنا، وينطبق على وصفنا للظواهر الطبيعية وصولًا إلى مقياس الذرات وما وراءه، حين كان كوننا في تلك اللحظات الأولى منضغطًا في مساحة قدرها ١٠^{−٣٥} أمتار، كان من شأن نظرية الجاذبية الكمية أن تجمع المكان والزمان معًا على نحو معقد لا ينفصم. ففي الجاذبية الكمية لا بد للمكان والزمان أن يكونا «واحدًا» بطريقة ما.

يوحي عدم اليقين المتبادل بين الحركة، والزخم، والطاقة، والموضع في الزمان والمكان بأنه في الجاذبية الكمية تحدث تذبذبات في نسيج المكان والزمان نفسيهما. وإن استطعنا قياس مسافات صغيرة مقارنة بالبروتون كما يكون البروتون مقارنة بالإنسان، أو أن نسجل مقاييس زمنية تصل في قصرها إلى ١٠^{−٤٣} ثوانٍ، لوجدنا أن مصفوفة نيوتن تبددت إلى زبد من الزمكان. أعجز عن تخيل ما سيكون عليه هذا، لكن كُتَّاب الخيال العلمي سيحبونه.

ثمة اتفاق عام على أن كل ما نعرفه الآن نشأ من الفراغ الكمي، حتى مصفوفة المكان والزمان. وكما سنرى، لهذا الفراغ المحموم تبعات عميقة على فهمنا لطبيعة الخلق من العدم.

البحر اللانهائي

يرجع استقرار المادة والانتظام الدوري في جدول مندليف للعناصر الذرية في نهاية المطاف إلى حقيقة أن الإلكترونات تتبع مبدأ أساسيًّا من مبادئ ميكانيكا الكم يُعرف باسم «مبدأ الاستبعاد»، الذي ينص على أنه يستحيل أن يحتل إلكترونان في مجموعة واحدة نفس حالة الطاقة الكمية. عندما أدرك بول ديراك أن نظرية الكم تقضي بإمكانية وجود نظائر موجبة الشحنة مضادة للإلكترونات تُعرف بالبوزيترونات، استخدم مبدأ الاستبعاد هذا لعمل نموذج للفراغ من شأنه أن يتسبب تلقائيًّا في وجود مثل هذه الجسيمات العجيبة. اقترح ديراك أن ننظر إلى الفراغ على أنه غير خاوٍ بالمرة؛ فالفراغ بالنسبة له كان مليئًا بعدد لا نهائي من الإلكترونات التي تشغل طاقاتها المنفردة كل القيم، بداية من قيم سلبية لانهائية وحتى قيم قصوى. يمتد هذا البحر العميق الهادئ في كل مكان ولا يلحظه أحد ما دام لم يعكر صفوه شيء. ونطلق على هذه الحالة العادية «الحالة القاعية»، وهي المستوى الأساسي الذي نحدد كل الطاقات مقارنة به: يحدد «مستوى سطح البحر» لديراك نقطة الصفر للطاقة.

يمكن إعادة ترتيب معادلة أينشتاين الشهيرة، الطاقة = الكتلة × مربع سرعة الضوء، لتكون هكذا: الكتلة = الطاقة/مربع سرعة الضوء، وهو ما يعني أنه يمكن إنتاج الكتلة من الطاقة. للإلكترون وتوءمه المضاد، البوزيترون، نفس الكتلة × مربع سرعة الضوء، ولهما شحنات كهربائية متساوية لكن متضادة. لذلك إذا تجاوزت الطاقة E ضعف مقدار الكتلة × مربع سرعة الضوء، يمكن أن يظهر إلكترون وبوزيترون من العدم. يمكن لتذبذبات الطاقة في الفراغ أن تتحول تلقائيًّا إلى إلكترونات وبوزيترونات، لكنها محكومة بمبدأ عدم اليقين بحيث تدوم لجزء يسير من الثانية فحسب لا يتجاوز $\hbar$/ضعف الكتلة × مربع سرعة الضوء، وهو ما يعادل ١٠^-٢١^ ثوانٍ. وهذه الفترة الزمنية محدودة للغاية حتى إن الضوء ما كان ليقطع سوى واحد على الألف من قطر ذرة الهيدروجين. يستحيل رؤية مثل هذه الجسيمات «الافتراضية» بأكثر مما يُرى مقدار الحيود عن حفظ الطاقة الذي تتسبب به هذه التذبذبات. غير أنه يمكن الكشف عن فكرة أن الفراغ مليء بالجسيمات الافتراضية عن طريق القياسات الدقيقة المضبوطة.

تحيط بالجسيم المشحون كهربائيًّا، كالإلكترون أو الأيون، سحابة افتراضية من الإلكترونات أو البوزيترونات. وتحيط به أيضًا كل الأنواع الأخرى من الجسيمات المشحونة ونظائرها المضادة، وكلما كانت أثقل قل تذبذبها، وعلى هذا لمَّا كان الإلكترون والبوزيترون

هما الأخف، فهما إذن الجسيمان المهيمنان. أحد تأثيرات هذه السحب يتمثل في تخفيف شدة القوى الكهربائية بين الجسمين المشحونين. وكلما كانت عدسة المجهر المستخدم أرق، زادت قدرتنا على رصد تأثير هذه السحب الافتراضية في الفراغ. وبينما يظهر زوج الإلكترون والبوزيترون ويختفي في هذا الوجود الافتراضي في غضون جزء على ألف من قطر الذرة، بإمكانه أن يؤثر على القوة المتولدة بين البروتون والإلكترون البعيد في ذرة الهيدروجين، وهو ما يسبب تعديلًا طفيفًا لقانون التربيع العكسي للقوة، ويؤثر أيضًا على مغناطيسية الجسيمات مثل الإلكترون بطرق قابلة للحساب تتفق مع البيانات بدقة تتجاوز الجزء على المائة مليار.

في تفسير ديراك للفراغ بوصفه بحرًا لانهائيًّا عميقًا مليئًا بالإلكترونات، إذا فُقد إلكترون واحد في هذا البحر، فإنه يترك مكانه ثقبًا. يظهر غياب الإلكترون سالب الشحنة ذي الطاقة السالبة مقارنة بمستوى البحر على صورة جسيم موجب الشحنة ذي طاقة موجبة، تحديدًا جسيم له جميع خصائص البوزيترون. يمكن للتذبذبات الحادثة في سطح البحر، بالتعاون مع ظاهرة طاقة نقطة الصفر التي وصفناها سابقًا، أن تنشط الإلكترون المغادر للثقب على نحو لحظي، فيظهر مكانه زوج افتراضي من إلكترون وبوزيترون.

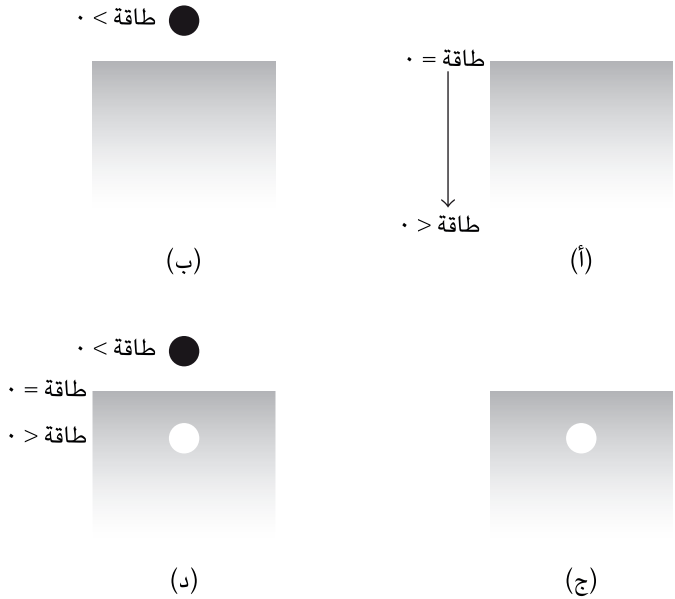
من الممكن جعل هذه التذبذبات الافتراضية مرئية من خلال تزويد الذرة بالطاقة. إذا قُذفت الذرة بفوتون له طاقة تتجاوز ضعف الكتلة × مربع سرعة الضوء، أغلب الظن أنه سيؤين هذه الذرة. غير أنه من الممكن أن يموج الإلكترون والبوزيترون الافتراضيان داخل المجال الكهربائي للذرة في الوقت الذي يصدمهما فيه الفوتون. في هذه الحالة سيطردهما الفوتون خارج الذرة، تاركًا الذرة في حالة هدوء. يمكن تصوير هذه الظاهرة، المعروفة باسم «تخليق الأزواج»، في غرفة فقاقيع، وهو ما يؤدي لظهور شكل فني رائع ومبهم كما في الشكل ٧-٣. وهكذا يصير الجسيمان الافتراضيان حقيقيين.

يرى ديراك أن هذه الأجسام المضادة هي ثقوب تخلفت في البحر العميق اللانهائي الذي هو الفراغ. أيضًا تحل هذه الصورة أمرًا آخر قد يبدو متناقضًا؛ فإذا كان الفراغ خاويًا بحق، ما الذي كان سيشكل قوانين الطبيعة، وخصائص المادة، بحيث يكون لجميع الإلكترونات والبوزيترونات المخلقة «من العدم» خصائص متطابقة وكتل محددة، بدلًا من أن تكون لها قيم عشوائية؟ تتبع البروتونات والكواركات وجسيمات أخرى مشابهة أيضًا مبدأ الاستبعاد، وتملأ بحرًا عميقًا لانهائيًّا. وهذا المستودع العميق اللانهائي المتمثل في بحر ديراك هو الذي يمدنا بجسيمات المادة.



شكل ٧-٣: تخليق الأزواج.[1]

طبقًا لهذا التفسير، الفراغ هو وسط. للفراغ صلات عميقة بالظواهر التي تحدث في الوسائط «الحقيقية»، مثل المواد الصلبة والسائلة حيث تنظم أعداد هائلة من الذرات أو الجسيمات نفسها «أطوارًا» مختلفة. ومن ثم يشبه الفراغ الكمي الترتيب الذي يملك أدنى حد ممكن من الطاقة، أي «الحالة القاعية»، لنظام متعدد الجسيمات. سنتناول المزيد عن ذلك في الفصل التالي. لهذا الأمر تبعات عميقة، بما في ذلك احتمالية أن طبيعة الفراغ لم تكن واحدة على مدار تاريخ الكون. يثير هذا أيضًا احتمالًا مثيرًا: أنه بمقدور المرء أن «يضيف» شيئًا إلى الفراغ ومع ذلك «يقلل» من طاقته. في هذه الحالة سيصنع المرء حالة فراغ جديدة؛ فالفراغ السابق، الذي يتمتع بطاقة أعلى من الحالة القاعية الحقيقية، يُعرف بـ «الفراغ المزيف». والتحول من الفراغ المزيف إلى الفراغ الجديد يُعرف باسم «التغير الطوري». يخمن المنظرون — ولعل تجارب فيزياء الطاقة العالية تجيب



شكل ٧-٤: (أ) الفراغ مليء ببحر عميق لا نهاية له من مستويات الطاقة الممتلئة، بداية من تلك السالبة بلا نهاية وصولًا لتلك القصوى. وهذا الترتيب، حالة الطاقة الدنيا، مستوى الطاقة به يساوي صفرًا. (ب) حالة ذات طاقة موجبة، على سبيل المثال، إلكترون ذو طاقة موجبة بالنسبة للفراغ. (ج) ثقب في الفراغ. سيبدو غياب الحالة ذات الطاقة السالبة والشحنة الكهربية السالبة على صورة حالة ذات طاقة موجبة وشحنة موجبة. هذا هو تصور ديراك عن الجسيم المضاد للإلكترون: البوزيترون. (د) حالة ذات طاقة سالبة خالية وحالة ذات طاقة موجبة ممتلئة. يمكن أن يكون هذا إلكترونًا ذا طاقة موجبة ويُدرك «الثقب» بوصفه بوزيترونًا ذا طاقة موجبة. لإنتاج هذا الترتيب يجب أولًا تزويد الفراغ بالطاقة. هذه الطاقة يمكن توفيرها من خلال فوتون بحيث يتحول الفوتون إلى إلكترون وبوزيترون. يمكن رؤية صورة لمثال واقعي على هذه العملية في الشكل ٧-٣.

عن هذا عما قريب — أن شيئًا من هذا القبيل حدث في وقت مبكر من تاريخ الكون عند درجات حرارة تتجاوز مليون المليار درجة (انظر الفصل الثامن).

هوامش

(1) © Lawrence Berkeley Laboratory/Science Photo Library.

الفصل الثامن

فراغ هيجز

أطوار وتنظيم

تناولنا في الفصل السادس باختصار فكرة التنظيم، التي بموجبها يمكن لعدد كبير من الذرات والجزيئات أن تتمتع بخصائص يستحيل أن تتمتع بها منفردة. ولمَّا كان الفراغ الكمي يمتلئ بالجسيمات، يمكنه أيضًا أن يتمتع بخصائص غير متوقعة اعتمادًا على تنظيم مكوناته. وهناك أمثلة كثيرة مألوفة على التنظيم، ولأن هذه الأمثلة هي التي أوحت بالأفكار الحديثة حول طبيعة الفراغ، سأستهل هذا الفصل بوصف بعضها.

يقال إن بزوغ ظاهرة جديدة يحدث حين تنشأ هذه الظاهرة الفيزيائية نتيجة تنظيم أي أجزاء على نحو معين، في حين أن نفس الظاهرة لا تظهر حين تكون الأجزاء منفصلة كلٌّ على حدة. في فن الرسم مثلًا تُرسم بقع الألوان المنفردة وتُلون عشوائيًّا في لوحة زيتية انطباعية لمونيه أو رينوار، ومع ذلك عندما تنظر إليها عن بعد تصير اللوحة بأكملها منظمة في صورة رائعة لحقل من الأزهار. إن قصور ضربات الفرشاة الفردية هو ما يثبت أن ظهور اللوحة على هذا الشكل هو نتيجة لتنظيمها. وبالمثل، يمكن أن تشكل «حركات الفرشاة» الفردية الذرية تنظيمًا متكاملًا قادرًا على فعل أشياء لا تستطيع الذرات المنفردة، ولا حتى مجموعات صغيرة منها، أن تفعلها. هكذا يطابق البروتون أو الإلكترون الواحد بروتونًا أو إلكترونًا آخر، وكل ما في وسعهما فعله وحدهما هو أن يجذب أحدهما الآخر عن طريق التجاذب الكهربائي لتكوين الذرات، وتمكن الكهرباء الموجودة داخل الذرات مجموعات الذرات من الانضمام بعضها لبعض مكونة الجزيئات، وعندما يتجمع عدد كافٍ منها يمكن أن يصير كائنًا واعيًا؛ مثلك تمامًا وأنت تقرأ هذا الكتاب.

هناك معادن معينة يمكنها أن تطرد المجالات المغناطيسية عندما تُبرد إلى درجات حرارة شديدة الانخفاض، فينتج ما يُعرف بالموصلية الفائقة، ومع ذلك ليس بمقدور الذرات المنفردة التي تكوِّن المعدن أن تفعل هذا. وثمة مثل على ذلك من الحياة اليومية هو نشوء المواد الصلبة والسائلة والغازية من مجموعات كبيرة من الجزيئات، كالماء على شكل سائل وجليد وبخار. إننا نثق ثقة عمياء في أن أرضية الطائرة التي تحلق بنا على ارتفاع ١٠ آلاف متر لن تفقد صلابتها فجأة وتلقي بنا إلى السُّحُب تحتها. وبالمثل، يثق شعب الإسكيمو في صلابة الكتل الجليدية الصلبة تحت أرجلهم، مع أن أي ارتفاع طفيف في درجة الحرارة يمكن أن يذيبها، تاركًا إياهم هائمين في البحر.

إننا نعهد بأماننا إلى تنظيم الجزيئات المنفردة، حتى على الجليد السميك. وفي المواد الصلبة الكريستالية يكون تنظيمها على شكل شبكة هو ما يمنحها الصلابة وكذا الجمال الأخاذ؛ إذ يمكن لذرات الكربون أن تنظم نفسها لتأخذ شكل الماس، أو السخام. وفي المادة الصلبة نجد الذرات المنفردة ثابتة في مكانها قريبة بعضها من بعض، لكن قد تتسبب الحرارة في اهتزازها قليلًا، بحيث تتزحزح قليلًا عن المكان المخصص لها. لكن بفضل تلاحمها بالذرات المجاورة فإن الأخطاء الوضعية لا تتراكم، ويمكن أن يحتفظ التكوين ككل بكمال وصلابة ظاهرين. أما في الطور السائل، فيكون الاهتزاز من الشدة بحيث تفقد الذرات تنظيمها وتنساب.

في بعض المواد يحدث التغير فجأة؛ فالانتقال فوق درجة الصفر المئوي أو أدناها بكسر عشري واحد قد يحدث الفارق بين تجمد الجليد وذوبانه. ولا يحدث هذا أي فارق مع مواد أخرى كالزجاج، إذ لا توجد طريقة ذات مغزى لمعرفة هل هو صلب أم سائل شديد اللزوجة. يكون الهيليوم في صورة غازية في درجة حرارة الغرفة، وسائلة عند التبريد، لكن مهما قللت درجة الحرارة فإنه لا يتجمد قط. لكن إذا عرضت الهيليوم للضغط فسوف يتبلر.

توضح هذه الأمثلة أطوارًا مختلفة تمر بها المواد اعتمادًا على الطريقة التي تنظم بها الجسيمات نفسها. يمكن أن تحدث نتائج شائقة حين تعيد المجموعات تنظيم نفسها مع انتقالها من أحد الأطوار إلى طور آخر، كما هو الحال مع الماء والجليد عند درجة الصفر المئوي.

عند أي درجة حرارة تعد الحالة المنظمة ذات القدر الأدنى من الطاقة هي الأكثر استقرارًا، ويكون لها الأولوية عند تحديد الطور المفضل. ودرجة حرارة الوسط وسيلة

لقياس طاقته، لا سيما تلك الحرارة الناجمة عن طاقة الحركة لمكوناته. وكلما ارتفعت درجة الحرارة زادت الحركة العشوائية. تحت درجة الصفر المئوي، تميل جزيئات الماء إلى التشبث بعضها ببعض، ويؤلف تداخلها الذري أشكالًا من التنظيمات البلورية، فتتكون الأنماط السداسية المتشابهة الشائعة في ندف الصقيع المتكونة على الألواح الزجاجية في الشتاء. تكون حركة الجزيئات عند درجات الحرارة هذه محدودة للغاية، حتى إن التصادم بينها لا يولد الطاقة الكافية لتمزيق الروابط التي تجمعها معًا. غير أنه فوق درجة حرارة الصفر المئوي ترتفع الطاقة ويشتد العنف الناجم عن التصادمات فلا تستطيع بلورات الجليد أن تظل مترابطة. فعند إضافة أي قطعة من الثلج إلى مشروبك السائل الذي تزيد درجة حرارته عن الصفر المئوي، فإن جزيئات الثلج تصطدم بعنف بجزيئات السائل الدافئ، وهكذا تتفسخ الجزيئات بعضها عن بعض وتتدفق في صورة سائلة هي الأخرى.

عند درجة حرارة الصفر المئوي يتحول خليط السائل والثلج إلى ثلج، لأنه في هذا الطور تتمتع الجزيئات بطاقة أقل عن تلك التي تتمتع بها في الطور السائل. وبينما تتحول إلى الحالة الصلبة، تنطلق الطاقة الزائدة على صورة حرارة (فيما يُعرف باسم الحرارة الكامنة). لا يكون مقدار الطاقة هذا هائلًا، لكن يمكننا أن نجري تجربة فكرية لتخيل ما سيحدث إذا كان مقدار الطاقة أعظم وأكبر حتى من الطاقة اللازمة لتكوين جزيئات من الجليد والجليد «المضاد». لو سارت الأمور في الطبيعة على هذه الصورة، لظهرت ندف الجليد وندف الجليد المضاد تلقائيًّا من العدم عندما تهبط درجات الحرارة إلى الصفر المئوي.

في تلك الأثناء، يحدث لغز مثير. ففوق درجة الصفر المئوي تبدو الحالة القاعية لجزيئات الماء متماثلة أينما نظرت. ونصف الجزيئات هنا بأنها متناظرة تحت التدوير. لكن ندفة الجليد ليست كذلك؛ فهي تتمتع بشكل بديع، ولها تناظر سداسي، بمعنى أنك إذا أدرتها بزاوية ٦٠ درجة فسترى نفس ما تراه، أما إذا أدرتها بأي زاوية أخرى فسترى ندفة جليدية مدارة. قد يشير أحد أطرافها في اتجاه الساعة الثانية عشرة مثلًا، وفي هذه الحالة يتعين على بقية الأطراف أن تشير إلى الساعة الثانية والرابعة والسادسة والثامنة والعاشرة، أو قد يشير الطرف إلى الساعة الواحدة وهنا ستشير بقية الأطراف إلى الأرقام الفردية على الساعة. وبينما تتكون مليارات الندف الجليدية، تكون اتجاهاتها عشوائية حتى إن الشكل الإجمالي للحالة القاعية الجديدة لها، والممتلئة الآن بالندف الجليدية،

يبدو متماثلًا من جميع الاتجاهات. غير أنه من نقطة إلى أخرى ينكسر التناظر؛ فقد يشير طرف ندفة إلى اتجاه ما وتشير جارتها إلى اتجاه مخالف.

مثال آخر ذو أهمية كبيرة في فهمنا للفراغ هو ظاهرة المغناطيسية، التي تنتج عن دوران الإلكترونات حول نفسها، بحيث يقوم كل إلكترون بدور مغناطيس صغير. في الحديد تفضل الإلكترونات المتجاورة الدوران في الاتجاه عينه بعضها مثل بعض لأن هذا يقلل طاقتها؛ فلكي تقلل طاقة حشد الإلكترونات بأكمله، لا بد أن تدور جميعها في الاتجاه عينه، وهو ما ينتج عنه وجود محور مغناطيسي شمالي-جنوبي إجمالي للمعدن. هذه هي حالة الطاقة الدنيا، أو الحالة القاعية. غير أنه فوق درجة الحرارة ٩٠٠ مئوية تكون الطاقة الإضافية التي تنتج عن الحرارة أكثر من كافية لتحرير كل إلكترون دوار من ارتباطه بجيرانه، وفي مثل هذه الحالة تشير هذه المغناطيسات الصغيرة في اتجاهات عشوائية وتتلاشى الخاصية المغناطيسية الإجمالية لها. وهكذا يمكن أن يمر الحديد بطور من المغناطيسية أو طور من عدم المغناطيسية، اعتمادًا على درجة الحرارة.

لو تخيلنا أن هناك كائنات خرافية تعيش في هذه الأنظمة، فسيبدو لها أن حالة أدنى الطاقة هي القاعدة الطبيعية. وكل شيء أدركته هذه الكائنات بشأن الأنظمة المرتبة سيشبه ما ندركه عن الفراغ في كوننا. الفراغ الكمي في كوننا يشبه الوسط، ولا يكون فارغًا تمامًا. ويمكن تنظيمه أيضًا على شكل أطوار مختلفة، وثمة خصائص وظواهر مثيرة يمكن أن تقع والمرء يجتاز طورًا إلى آخر. ومن المعتقد على نطاق واسع أن هذا هو ما أثر على طبيعة الزمكان في اللحظات الأولى من حياة كوننا.

هكذا يكون لدينا الآن منظور جديد للسؤال الذي طرحه الفلاسفة القدماء هل الطبيعة تسمح بوجود فراغ. تعتمد الإجابة على وجهة نظرنا، سواء كانت «لا» (بمعنى أن الفراغ مليء بالفعل ببحر لانهائي من الجسيمات بالإضافة إلى التذبذبات الكمية) أو «نعم، هناك أنواع عديدة مختلفة من الفراغ» (أي اعتمادًا على الكيفية التي يُنظَّم بها الوسط، الذي هو الفراغ الكمي). تميل المعرفة السائدة في الفيزياء إلى كفة الإجابة بنعم. وسنعرف المزيد عن هذا بعدما نرى كيف أن الأنماط والشكل يمكن أن تظهر مع انتقال الفراغ الكمي من حالة منظمة إلى أخرى.



شكل ٨-١: التناظر السداسي لندفة الجليد.[1]

التحولات الطورية والفراغ

لا تظهر العديد من الأنظمة الفيزيائية التناظرات الأساسية للقوى التي تبينها؛ فالقوى الكهرومغناطيسية لا تبالي بما إذا كان اتجاه القوة ناحية اليسار أو اليمين، غير أن الجزيئات البيولوجية سواء على صورة طعام أو مواد مفيدة يكون لها صور معاكسة طبق الأصل قد تكون جامدة أو حتى قاتلة.

وازن قلم رصاص أسطواني الشكل مثالي التصميم على طرفه. لف القلم: سيبدو شكل القلم واحدًا دون اختلاف. يُعرف عدم التغير الحادث مع الدوران بالتناظر، وفي هذه الحالة بالتناظر الدوراني. ولمَّا كان القلم واقفًا على طرفه، فاستقراره مؤقت لأن قوة الجاذبية ستجذبه إلى الأرض إذا تزحزح من الوضع العمودي بأقل مقدار. قوة الجاذبية متناظرة دورانيًّا، وهو ما يعني أنه عندما يسقط القلم إلى الأرض، ما من تفضيل لاتجاه على الآخر. كرر التجربة آلاف المرات وستجد أن القلم سيسقط في جميع نقاط المحيط،

وهو ما يتوافق مع التناظر الدوراني. بيد أنك لا تستطيع أن تجزم بناء على أي تجربة فردية في أي اتجاه سيسقط القلم؛ فبعد أن يسقط، في اتجاه الشمال مثلًا، ستكون «الحالة القاعية» قد كسرت التناظر الدوراني. لعبة الروليت هي مثال آخر على ذلك. العب لفترة طويلة للغاية ولسوف تجد أن احتمالات فوز جميع الأرقام متساوية، وهذا يضمن أن الكازينو سيكسب لأن استقرار الكرة على أي رقم غير الذي اخترته يعني خسارتك. لكن في أي دور تلعبه، يكون مصدر المقامرة هو عجزك عن التنبؤ على نحو مؤكد بالرقم الذي ستستقر عليه الكرة.

في مثال القلم، فإن الحالة التي يكون التناظر فيها مكسورًا تكون أكثر ثباتًا من حالة التناظر، التي يحتفظ فيها القلم بتوازنه على سنه على نحو متقلقل. بصفة عامة، للقوانين التي تحكم أي نظام قدر من التناظر، لكن إذا وجدت حالة أكثر ثباتًا تفسد هذا التناظر، فإن التناظر «ينكسر على نحو تلقائي»، أو يكون «مستترًا». وقد كان هذا هو الحال مع ندفة الجليد والماء ومغناطيسية الحديد.

قد تقول إن هذا غير صحيح، مؤكدًا على أن هذا ليس خطأ التناظر، بل يرجع أكثر لعدم دقة المرء في موازنة القلم: «فقد سقط القلم لأنه لم يكن منتصبًا على نحو تام». وهذا حقيقي، لكن افترض أنه كان متوازنًا في نقطة مصممة تصميمًا مثاليًّا. حتى عندئذ ستكون ذرات سن القلم في حالة حركة عشوائية بسبب درجة الحرارة، تلك الحرارة الآتية من طاقتها الحركية. تعني هذه العشوائية أن اتجاه السقوط عشوائي. قد تتفق معي في هذا لكن قد تقترح أن نجري التجربة عند درجات حرارة تقترب من الصفر المطلق، −٢٧٣ مئوية، حيث تشارف طاقة الحركة على الزوال. تفترض تجربتك الفكرية أن سن القلم مصنوع من جزيئات كروية تامة الاستدارة، وأن الجزيء المركزي تجمد في مكانه عند درجة حرارة الصفر المطلق حيث توقفت الحركة الحرارية. وهنا تتدخل قوانين الكم لتفسد هذه الصورة. فإذا تلاشت الحركة يصير الموضع غير معروف، وتكون نقطة التوازن نفسها عشوائية. وإذا عُرف موضع النقطة على وجه الدقة في لحظة ما، لصارت الحركة غير محددة، ولصار عدم التوازن الناتج غير متوقع. يبدو في هذه الحالة، وبصفة عامة، أن نسيج الطبيعة الكمي يسمح لحالة عدم الاستقرار عالية الطاقة أن تختار حالة الطاقة الدنيا التي ينكسر فيها التناظر تلقائيًّا. ولهذا يتسبب ذوبان الجليد، أو تسخين المعدن المغنط، في عودة التناظر مجددًا، لكن حين يُسمح له بالبرودة ثانية، ينكسر التناظر دون تذكر لما كان عليه الوضع قبل ذلك.

تقضي القاعدة بأن رفع درجة الحرارة يتسبب في محو البنية والتعقيد مؤديًا إلى وجود نظام «أبسط». فالماء بسيط، أما بلورات الجليد فجميلة الشكل.

الكون اليوم بارد، وجميع القوى وأنماط المادة المختلفة ما هي إلا بنى متجمدة في نسيج الفراغ. إننا بعيدون كل البعد عن تلك الحرارة الهائلة التي عمت الكون في أعقاب الانفجار العظيم، لكن إذا عمدنا لتسخين كل شيء مجددًا، ستختفي الأنماط والبنى. للذرات وأنماط جدول مندليف معنى فقط في درجات الحرارة التي تقل عن ١٠ آلاف درجة مئوية، أما فوق هذه الدرجة فتتأين الذرات إلى بلازما من الإلكترونات والجسيمات النووية كما الحال في الشمس. وفي ظل درجات حرارة أعلى من ذلك، فإن الأنماط المتجسدة في «النموذج المعياري» للجسيمات والقوى — حيث تقع الإلكترونات في عائلة اللبتونات، إلى جانب عائلات الكواركات والقوى المتفاوتة — لا تتحمل هذه الحرارة. في الواقع، في طاقات تزيد عن المائة إلكترون فولت، التي إذا عمت المادة كلها فستتوافق مع حرارة قدرها $١٠^{١٥}$ درجات مئوية، فإن القوة المغناطيسية والقوة النووية الضعيفة التي تتحكم في نشاط بيتا الإشعاعي تتحدان في قوة واحدة متناظرة. تقضي النظريات التي تصف المادة والقوى كما نراها في حالتها الباردة بأن هذه البنى ستذوب وتتحد تحت الحرارة العالية. وتقضي النظريات أيضًا بأن نمط الجسيمات والقوى الذي يحكمنا قد يكون مجرد بقايا عرضية متجمدة عشوائيًّا لعملية انكسار تناظر حدثت حين «تجمد» الكون في حرارة قدرها $١٠^{١٧}$ درجات مئوية. إننا أشبه بالقلم الذي سقط وطرفه متجه صوب الشمال، أو عجلة الروليت التي استقرت بها الكرة في فتحة مكنت الحياة من النشوء. ولو أن الكرة استقرت في أي فتحة أخرى، كأن تكون كتلة الإلكترونات أكبر أو تكون القوة النووية الضعيفة أضعف مما هي عليه بالفعل، لكنا خسرنا اليانصيب ولم تكن الحياة لتظهر مطلقًا.

هنا سأعود مجددًا إلى المعضلة التي بدأنا بها. لو أن انكسار التناظر التلقائي قد تسبب في إيجاد ضوابط وقوى مختلفة، ما كنا لنوجد من الأساس بحيث نعرف هذا. وهذا يثير فكرة متطرفة تقضي أنه من الممكن أن توجد فراغات عدة، وأكوان متعددة، وأن كوننا تصادف وحسب أنه الكون الذي اتخذت فيه الأرقام قيمًا مناسبة.

من الأمثلة الملائمة هنا قطعة الحديد المغنطة: سخنها، بحيث تدمر المغناطيسية، ثم بردها ثانية. في أحد أجزاء القطعة تشير المغناطيسات الذرية المتجمدة في اتجاه ما، وفي أجزاء أخرى تشير في اتجاه آخر. تعرف هذه الظاهرة باسم «النطاقات المغناطيسية».

هل يمكن أن يكون هذا نموذجًا للكون؟ وضع المنظرون نماذج حسابية للانفجار العظيم تعين عليها أن تتفق مع ما نعرفه، نماذج تظهر تناظرًا «حقيقيًّا» في تلك الفترة الحارة المبكرة من عمر الكون. ويبدو أن السمة العامة هي أن هذه النماذج تقضي بأنه حين برد الكون بعد مرحلته الأولى المتناظرة، كان هناك «مشهد عام» من الحلول الممكنة. حين تنظر في المشهد العام، سترى أنه يوجد إجمالًا تناظر مبدئي: فشأن اتجاهات القلم الساقط نحو جميع النقاط على البوصلة، ثمة كتل وقوى من كل المقادير الممكنة، التي تتوافق مع التناظر الأصلي. وما قد يكون صحيحًا في هذا الجزء من الكون، وعلى امتداد ملايين السنوات الضوئية التي نستطيع رصدها، قد يكون مختلفًا في مكان آخر.

القوى المتغيرة في الفراغ

يتسبب فوران الفراغ في إرباك الإلكترونات المارة بالجوار ومن ثم القوى التي يمارسها كل جسيم مشحون على الجسيم المجاور له. ومع أن قانون التربيع العكسي للقوة الكهروستاتيكية هو القانون الطبيعي للمجالات الكهربية التي تنتشر على نحو متساوٍ عبر الفضاء ثلاثي الأبعاد، فإن البيانات الدقيقة تبين وجود انحرافات طفيفة عن هذا. فعند التحرك بسرعة تساوي واحدًا على المائة من سرعة الضوء، تكون تأثيرات الجاذبية قابلة للقياس. إن تمدد وتداخل الفضاء والزمان يشوه سلوك التربيع العكسي معطيًا تأثيرات طفيفة إضافية تنمو على نحو أسرع من التربيع العكسي حين تقترب شحنتان إحداهما من الأخرى. ومثل المغناطيسية، هذه هي التجسيدات المباشرة للنسبية. وحين تقترب شحنتان إحداهما من الأخرى أكثر من ذلك، بحيث تفصلهما مسافة أصغر من طول الذرة، يتسبب الفراغ الكمي في تشويه هاتين القوتين أكثر وأكثر.

كما ذكرت من قبل، تنتقل القوى بواسطة جسيمات تحمل الطاقة والزخم من جسم إلى آخر. في حالة القوة الكهرومغناطيسية فإن تبادل الفوتونات هو ما يؤدي هذه المهمة. فإذا انتقلت الفوتونات مباشرة من جسيم مشحون إلى آخر دون إعاقة، ينطبق قانون التربيع العكسي، أما إذا أعيق انتقال الفوتون بواسطة الفراغ الكمي، على غرار ذلك الذي يتذبذب إلى إلكترون وبوزيترون افتراضيين على الطريق، تتغير شدة القوة على نحو طفيف.

ومن ثم، تعمل الشحنتان الموجبة والسالبة للإلكترون والبوزيترون الافتراضيين بمنزلة غطاء حول الشحنة الصافية التي أحدثت القوة. تبين القياسات التي جرى

التوصل إليها في مختبر سيرن أنه إذا اقتربت شحنتان حتى مسافة تصل إلى واحد على المائة مليون من قطر ذرة الهيدروجين، أي أصغر بألف مرة من حجم نواتها، فإن القوة الكهرومغناطيسية ستبدو أقوى مما هي عليه بنحو ١٠ بالمائة. وتشير الحسابات إلى أن القوة ستزداد أكثر من هذا في ظل المسافات الأقل، مع أنه ليس بالإمكان اختبار هذا تجريبيًّا بعد. وتقضي الأفكار الحديثة بأن الشدة «الحقيقية» للقوة الكهرومغناطيسية قد تكون أقوى بثلاث مرات مما يمكننا رصده من واقع القياسات على المستوى الأكبر. وحين تتسبب القوة الكهروستاتيكية في جعل مشط الشعر يجذب قطعة من الورق على مسافة ملليمترات قليلة، أو حتى حين يأسر البروتون إلكترونًا على طول الذرة، فإن القوة قد ضعفت بفعل شحنات المجالات الافتراضية الكامنة في الفراغ المتداخل. فقط على أدق المسافات، حيث تستطيع التذبذبات المتفردة وحدها أن تتدخل، يمكن الكشف عن الوجه الحقيقي للقوة المغناطيسية.

غير هذا الاكتشاف نظرتنا للقوى على نحو جذري. فداخل النواة تعمل قوتان أخريان، المعروفتان بالقوة النووية الشديدة والقوة النووية الضعيفة، وتشي أسماؤهما بمدى شدة قوتهما نسبة إلى القوة الكهرومغناطيسية. القوة النووية الشديدة مسئولة عن إبقاء الجسيمات موجبة الشحنة داخل النواة، أي البروتونات، على نحو محكم وذلك في مقابل قوى التنافر الكهربي المتبادلة بينها التي تعمل على التفريق بينها. وأيضًا داخل البروتونات والنيوترونات نفسها تعمل القوة النووية الشديدة على إبقاء الكواركات في سجنها الدائم. إحدى صور تجسد القوة النووية الضعيفة هي تحلل بيتا الإشعاعي، الذي يحدث حين تتحول نواة أحد العناصر الذرية إلى نواة لعنصر آخر. ومثلما تُحمَل القوة المغناطيسية بواسطة الفوتونات، تُحمَل القوة النووية الشديدة بين الكواركات بواسطة الجلوونات، وتُنقَل القوة النووية الضعيفة بواسطة بوزونات W المشحونة كهربيًّا أو بوزونات Z متعادلة الشحنة. تتأثر الجسيمات المختلفة بالفراغ بطرق مختلفة. على سبيل المثال، لا تتأثر الجلوونات بالإلكترونات والبوزيترونات والفوتونات، لكن يتعين عليها شق طريقها عبر سحب من الكواركات والكواركات المضادة، بل والجلوونات الأخرى الموجودة داخل الفراغ الكمي. أما البوزونات W وZ فتستطيع على النقيض من ذلك أن تتأثر بالجسيمات المشحونة الموجبة والسالبة، إضافة إلى الجسيمات عديمة الشحنة وعديمة الكتلة تقريبًا المعروفة بالنيوترينوات والنيوترينوات المضادة.

تظهر الحسابات أنه على الرغم من أن شدة القوة الكهرومغناطيسية تتزايد عند التخلص من التأثيرات الحاجبة للفراغ على المسافات القصيرة، فإن استجابة الجلوونات

المختلفة للفراغ تتسبب في إضعاف شدة القوة النووية الشديدة في ظل الظروف المشابهة. وقد أكدت التجارب ذلك. فالقوى الرابطة القوية التي تسيطر على نواة الذرة، وتمنحها الاستقرار، هي بالتالي نتيجة لتقوية الفراغ لقبضة الجلوونات على مسافات قدرها $١٠^{-١٥}$ أمتار. ومن ثم فإن كتل البروتونات والنيوترونات وفي النهاية كل المادة الكثيفة إنما ترجع إلى عمل الفراغ الجلووني عبر الأبعاد النووية. هذا أمر مدهش، غير أنه حقيقي. فالمقارنات الناجحة بين البيانات والاستنتاجات، التي تفترض أن الفراغ الكمي يلعب دورًا رئيسيًّا في الأمر، هي أكثر من مجرد مصادفة. علاوة على ذلك، فهي تمنحنا تلميحًا جذابًا مفاده أنه لولا تأثيرات الفراغ لكانت مستويات شدة كل هذه القوى متساوية على الأرجح. وإذا صح هذا، فسيستتبع وجود وحدة عميقة لقوى الطبيعة في أصلها، وأن تعدد الظواهر المختلفة التي تقع على المسافات القابلة للرصد، على غرار خبرات حياتنا اليومية، محكومة بواسطة الفراغ الكمي الذي نوجد داخله.

تتطلب معايشة القوى والطبيعة على مسافات صغيرة للغاية يكون تدخل الفراغ عنده غير ذي قيمة دراسة التصادمات بين الجسيمات في ظل مستويات مرتفعة للغاية من الطاقة. كانت هذه الظروف شائعة في الكون المبكر، حيث كان من شأن الحرارة الشديدة أن تتجسد من خلال الطاقة الحركية للجسيمات. تقضي نظرية القوى والفراغ التي يضمها «النموذج المعياري» لفيزياء الجسيمات بأنه في الكون المبكر، مرت حالة الفراغ في البداية بطور من التناظر كانت كل القوى فيه تملك الشدة نفسها، ومن ثم كانت موحدة في قوة واحدة. مع برودة الكون، وقعت تحولات طورية وبدلًا من حالة الفراغ المتناظر حلت حالات غير متناظرة على نحو متزايد. وهكذا انفصلت ما نطلق عليها اليوم القوة النووية الشديدة عن القوة الكهروضعيفة، وهو الاسم الذي سميت به القوة الكهرومغناطيسية والقوة النووية الضعيفة الموحدة، في درجة حرارة تزيد عن $١٠^{٢٨}$ درجات، وهو ما حدث بعد انقضاء نحو $١٠^{-٣٤}$ ثوانٍ على الانفجار العظيم.

أما انفصال القوة الكهروضعيفة إلى القوتين اللتين نعرفهما اليوم باسم القوة الكهرومغناطيسية والقوة النووية الضعيفة فقد حدث في درجة حرارة أقل قدرها نحو $١٠^{١٥}$ درجات، وهو ما يمكن الوصول إليه في تجارب سيرن، وقد خضع بالفعل لدراسة مفصلة. انكسار هذا التناظر مختلف إلى حدٍّ ما عن التغير الطوري الذي حدث قبل ذلك وأدى إلى انفصال القوة النووية الشديدة. فالقوة «الضعيفة» تبدو ضعيفة لأنها قوة قصيرة المدى، إذ تمتد عبر مسافات أصغر من نطاق البروتون، وهذا على العكس من

النطاق غير المحدود للقوة الكهرومغناطيسية. وهذا النطاق القصير يعني أن تأثيراتها على النطاق البعيد تبدو ضعيفة، مع أنها في جوهرها لا تقل قوة عن القوة الكهرومغناطيسية، وهو ما يتبدى على النطاق القريب. لماذا إذن نطاق عملها محدود لهذه الدرجة؟ الإجابة تتعلق بطبيعة الجسيمين الحاملين لها، البوزون W والبوزون Z: فمع أن الفوتون عديم الكتلة، فإن هذين الجسيمين ضخما الحجم، إذ تصل كتلتهما إلى مائة مرة قدر كتلة البروتون. وفقط حين تكون طاقات التصادمات، أو حرارة الكون، من العِظَم بما يكفي لجعل كتلة هذين الجسيمين مضروبة في مربع سرعة الضوء رقمًا تافهًا بالمقارنة، يمكن لوحدة القوى أن تتبدى. وهذا يأخذنا إلى أحدث الأبحاث الجارية حاليًّا عن طبيعة الفراغ، والمعنية بطبيعة وكتلة فراغ هيجز.

فراغ هيجز

إذن، تبدو القوة النووية الضعيفة بهذا الوهن بسبب نطاقها المحدود. لكن مقارنة بنطاق قدره نحو ١٠^{−٣١} أمتار الذي فيه تتوحد القوى وتكون التأثيرات المختلفة للفراغ الكمي غير ذات شأن، يصير النطاق البالغ قدره ١٠^{−١٨} أمتار والخاص بالقوة النووية الضعيفة كبيرًا إلى درجة لانهائية. من منظور الطاقة، بينما الفوتون عديم الكتلة، فإن البوزونين W وZ الحاملين للقوة الضعيفة لهما كتلة تقترب من المائة إلكترون فولت، وهو النطاق الذي يتحقق فيه التوحيد، لكن هذا يستدعي التساؤل عن الكيفية التي يمكن أن يكتسب بها البوزونان W وZ الكتلة بينما الفوتونات والجلوونات، التي يفترض أن تكون مرتبطة بهما، عديمة الكتلة. يُعتقد أن الإجابة تكمن في إحدى خصائص الفراغ، التي تخضع الآن لأولوية البحث في عالم فيزياء الجسيمات عالية الطاقة.

النظرية، التي يرجع الفضل فيها لبيتر هيجز، تقوم على أفكار الموصلية الفائقة التي اقترحها فيليب أندرسون، والتي وفقًا لها يعمل الفوتون كما لو أنه صار ضخم الكتلة. الموصلية الفائقة، كما يوحي اسمها، هي خاصية تفقد بموجبها بعض المواد الصلبة كل مقاومة بها للتيار الكهربي حين تنخفض حرارتها بدرجة كافية. وهذا التغير من العزل النسبي إلى التوصيل الفائق يعد مثالًا على التحول الطوري. بيد أن الموصلية الفائقة تحمل ما هو أكثر من مجرد السماح للإلكترونات بالتدفق بحرية، إذ إن هناك أيضًا ما يعرف بظاهرة ميسنر، والمتعلقة بسلوك المجالات المغناطيسية داخل الموصل الفائق أو حوله. قد يتخلل المجال المغناطيسي مادة صلبة دافئة، لكن في درجات الحرارة المنخفضة،

حيث تصير المادة فائقة التوصيل، يُطرد المجال المغناطيسي على نحو مباغت من كل مكان عدا قشرة رقيقة على السطح. وداخل المادة الصلبة، لا يصل المجال المغناطيسي إلا لمسافة محدودة، x، وإذا تذكرنا كيف يرتبط النطاق المحدود للقوة الضعيفة مع كتلة الحامل، البوزون W، إذن داخل الموصل الفائق يشير النطاق القصير للمجال المغناطيسي إلى أن حامله، الفوتون، يبدو وكأنه اكتسب كتلة قدرها $\hbar/xc$، حيث c هي سرعة الضوء.

النظريات المفسرة لهذه الظاهرة عميقة، ويمكن تأليف كتب كاملة لشرحها، ولست أنوي فعل هذا هنا. على نحو مشابه، وبتطبيق المعادلة على القوة الضعيفة، نريد أن يكون مجال W ذو الكتلة M قادرًا على اختراق الفراغ الكمي فقط لمسافة قدرها $x = \hbar/Mc$. والمقصود من هذا أن الفراغ الكمي، كما يُدرك من جانب القوة الضعيفة، يعمل كموصل فائق.

تعتمد ظاهرة الموصلية الفائقة على وجود مجالات للمادة ذات سمات خاصة. في الموصل الفائق الحقيقي، ينشأ طرد المجال المغناطيسي كنتيجة لعمل الإلكترونات الموجودة داخل المادة بتعاون، منتجة ما يعرف باسم «تيارات الحجب». في حالة القوة الضعيفة يتطلب التشبيه وجود نوع من مجالات المادة «داخل الفراغ». وهذا مختلف تمامًا عما قابلناه إلى الآن. فإلى الآن نظرنا إلى الفراغ الكمي بوصفه مليئًا بالمجالات الافتراضية والتذبذبات المقاربة قيمتها للصفر التي لا يمكنها التجسد إلا إذا توفر لها المزيد من الطاقة. لكن الآن، مع «مجال هيجز»، نحن نتفكر في شيء له وجود حقيقي في الفراغ؛ فالفراغ «الخاوي» الذي ليس به أي مجال هيجز سيكون به من الطاقة «أكثر» مما به لو أن مجال هيجز موجود به. وبعبارة أخرى: أضف مجال هيجز إلى الفراغ وستقل الطاقة الإجمالية.

لهذه النتيجة المفاجئة شبيه في المواد الصلبة، على غرار المغناطيس، كما رأينا في جزء سابق من هذا الفصل. ففوق درجة حرارة معينة، تعرف باسم «درجة حرارة كوري»، يتمتع المعدن بطاقة أقل مما يتمتع به وهو ممغنط، لكن حين يُبرَّد إلى ما دون درجة حرارة كوري، يصير المعدن مغناطيسًا. وهكذا في درجة حرارة منخفضة بما يكفي، تعمل «إضافة» المغناطيسية على تقليل طاقة الحالة القاعية، أو «الفراغ».

تقضي النظرية المفضلة في فيزياء الجسيمات بأن مجال هيجز يتخلل الفراغ ويمنح الكتلة للجسيمات الأساسية، ليس فقط للبوزونات W وZ، بل أيضًا للإلكترونات والكواركات وغيرها من الجسيمات. إذا صح هذا فهو يعني أنه في غياب مجال هيجز

لن تكون الجسيمات ساكنة مطلقًا بل ستتحرك بسرعة الضوء. ومع ذلك، فالفراغ مليء بمجال هيجز. وبينما تقرأ هذه الصفحة أنت تنظر عبر مجال هيجز؛ فالفوتونات لا تتفاعل معه وتتحرك بسرعة الضوء.

مجال هيجز عجيب بحق. فالجسيمات، كالإلكترونات، التي تتحرك بسرعة تقل عن سرعة الضوء إنما تفعل هذا لأن لها كتلة؛ كتلة اكتسبتها نتيجة تفاعلها مع مجال هيجز الموجود في كل مكان. ومع هذا فهي تواصل الحركة دون مقاومة؛ فقوانين نيوتن تعمل، وتواصل الجسيمات التحرك بسرعة ثابتة ما لم تؤثر عليها قوة خارجية. يمكن حل غموض هذه المعضلة بشكل جزئي إذا أدركنا أن طاقة الجسيم هي التي تحدد سرعته، وبما أن مجال هيجز هو حالة الفراغ ذات الطاقة الأقل، فلا يمكن نقل أي طاقة من مجال هيجز أو إليه، ومن ثم تحافظ الجسيمات على سرعتها. ليس من الممكن تحديد قيمة مطلقة للسرعة نسبة إلى مجال هيجز. باللغة الاصطلاحية: «فراغ هيجز هو فراغ نسبي».

مثلما أن الموصلية الفائقة والمغناطيسية هما أدنى حالات الطاقة فقط عند درجات الحرارة المنخفضة، أيضًا يعد الفراغ الذي يتغلغله مجال هيجز أدنى حالات الطاقة فقط عند درجات حرارة «منخفضة» بشكل كافٍ، حيث تعني «منخفضة» هنا ١٠^{١٧} درجات! ففي درجات الحرارة التي تزيد عن ١٠^{١٧} درجات، تقترح النظريات ألا تشتمل الحالة القاعية للكون على مجال هيجز. خلال أول جزء على تريليون من الثانية عقب الانفجار العظيم كان الكون أشد حرارة من هذا، ومنذ ذلك الوقت وحسب ملأ مجال هيجز الفراغ، مانحًا الكتل للجسيمات الأساسية.

ومثلما تنتج التموجات في المجالات الكهرومغناطيسية حزمًا كمية، أي فوتونات، ينبغي لمجال هيجز أن يتجسد على صورة بوزونات هيجز. وعلى غرار معضلة البيضة أم الدجاجة، يستشعر بوزون هيجز نفسه مجال هيجز الذي يتخلل كل شيء، ومن ثم يصير له كتلة. تقضي نظرية هيجز بأن ذلك البوزون الذي يحمل اسمه له كتلة ضخمة، تصل إلى ألف مرة قدر كتلة ذرة الهيدروجين. يقضي عدم اليقين الكمي بأن تتذبذب بوزونات هيجز بحيث تظهر وتختفي في الفراغ، وتقترح قياسات الدقة الخاصة بكيفية تأثير الفراغ على حركة جسيمات مثل الإلكترونات، وخصائص البوزونات W وZ الحاملة للقوة، أن هذه الجسيمات تتأثر ببوزونات هيجز الافتراضية هي الأخرى. وعند مقارنة جميع البيانات، يبدو أن بوزون هيجز قد يكون أخف مما ظُن سابقًا،

بحيث يصل على الأرجح إلى ١٥٠ مرة قدر كتلة ذرة الهيدروجين. في مختبر سيرن يمكن لحلقة مغناطيسية طولها ٢٧ كيلومترًا أن توجه أشعة من البروتونات المسرعة، التي حين يصطدم بعضها ببعض مباشرة يمكنها أن تنتج الظروف المناسبة لإنتاج بوزونات هيجز. وقد استغرق بناء هذا المعجل، المعروف باسم «مصادم الهادرونات الكبير» عشر سنوات، حتى اكتمل في عام ٢٠٠٧. قد يستغرق إجراء التجارب شهورًا، وقد يستغرق تحليل النتائج وتنقيحها سنوات. وإذا كان الفراغ مليئًا حقًّا بمجال هيجز، فمن المفترض أن نعرف هذا في القريب العاجل.

هوامش

(1) © Kenneth Libbrecht/Science Photo Library.

الفصل التاسع

الفراغ الجديد

بداية الكون

في بداية هذا الكتاب، بدأنا بالسؤال «من أين أتى كل شيء؟» وبعد أن استعرضنا أكثر من ألفي عام من الأفكار، وصلنا إلى الإجابة المعاصرة: «كل شيء أتى من لا شيء.» يرى الفيزيائيون المعاصرون أنه من الممكن أن يكون الكون قد انبثق من الفراغ. «ليس من الممكن لعلاقة أن تكون أكثر غرابة من العلاقة بين «اللاشيء» و«كل شيء».» أو باللغة الدارجة «قد يكون الكون الهبة المجانية الكبرى على الإطلاق». الفكرة هي أن كوننا يمكن أن يكون تموجًا كميًّا هائل الحجم ذا طاقة «افتراضية» مقاربة للصفر إلى درجة يصير معها عمره هائلًا. يمكن أن يحدث هذا لأن كلتا الطاقتين الموجبة والسالبة في الكون يعود مردهما إلى طاقة الجاذبية المتغلغلة في كل مكان. ولتوضيح هذا قد يكون من الأسهل أن نتذكر كيف صدت القوى الكهربائية داخل الذرة أي قوى دخيلة في الفصل الثاني.

لأن نواة الذرة موجبة الشحنة فهي محاطة بمجال كهربي يصد الشحنات الموجبة الأخرى، مثل جسيمات ألفا. تخيل أن هناك جسيم ألفا، وأنه بعيد للغاية عن النواة، ويتحرك بسرعة نحوها. ستكون الطاقة الإجمالية وقتها هي طاقة الحركة لجسيم ألفا. (للتبسيط، سأتجاهل الجاذبية والكتلة المضروبة في مربع سرعة الضوء، ولن تتأثر النتائج الجوهرية التي سنخرج بها). كلما اقترب الجسيم ألفا من النواة، شعر أكثر بقوة التنافر الكهربية وتباطأت سرعته. إذا كان على مسار تصادمي مباشر فسينتهي الحال به إلى السكون قبل أن يُصَد بعيدًا على امتداد مساره الأصلي. وفي اللحظة التي يتوقف فيها، تكون طاقة الحركة لديه صفرًا. يجب الحفاظ على الطاقة الإجمالية، ومن ثم ستحل طاقة الوضع محل طاقة الحركة.

عندما تتفاوت شدة الطاقة مع تغير التربيع العكسي للمسافة، كما الحال هنا، يتفاوت حجم طاقة الوضع عكسيًّا مع المسافة. ومن ثم حين تصير هذه المسافة كبيرة، كما هو الحال عندما بدأ الجسيم ألفا رحلته، تكون طاقة الوضع مقاربة للصفر. ومع اقتراب الجسيم من النواة، تتعاظم طاقة الوضع لديه. يتزامن تزايد طاقة الوضع مع تناقص طاقة الحركة إلى أن تصير طاقة الوضع في أقصى صورها ويتساوى حجمها مع مقدار طاقة الحركة التي امتلكها الجسيم عند البداية عندما يكون الجسيم على أقرب مسافة من النواة، ويكون في حالة سكون لحظي.

في هذا المثال، كل الطاقات موجبة، فطاقة الحركة الموجبة في البداية تتحول إلى طاقة وضع موجبة مع اقتراب الجسيم من النواة. الآن افترض أنه بدلًا من أن تكون الشحنتان موجبتين، ستكون إحداهما سالبة، كما الحال عندما ينجذب إلكترون بعيد نحو نواة موجبة الشحنة. إذا كان الإلكترون البعيد في البداية في حالة سكون، فستساوي طاقة حركته صفرًا، ولأنه بعيد عن النواة، ستساوي طاقة الوضع لديه صفرًا أيضًا. لكن نظرًا لوجود قوة «جاذبة» هنا، ينجذب الإلكترون صوب النواة، مكتسبًا سرعة ومن ثم طاقة حركية. وبما أن إجمالي الطاقة يجب أن يساوي صفرًا، تقضي الزيادة في طاقة الحركة أن طاقة الوضع يجب أن تكون سالبة، ويتزايد هذا مع اقتراب الإلكترون من النواة. إذن بالنسبة للقوة الجاذبة، يمكن أن تكون طاقة الوضع سالبة.

ينطبق هذا على الجاذبية، حين تجذب الكتل بعضها بعضًا. فطاقات الوضع للأرض أو للكواكب الحبيسة داخل مجال جاذبية الشمس سالبة بانتظام. في الواقع، إن «مجموع» طاقات الحركة والوضع لديها أقل من الصفر، وهذا هو ما يسبب ارتباطها بالمجموعة الشمسية، وأنها أسيرة لمجال جاذبية الشمس. وبالمثل، أنا وأنت أسرى لمجال جاذبية الأرض. وإذا دفعت جسمًا إلى أعلى بطاقة حركة فسيسقط مجددًا على الأرض ما لم تعطه سرعة مبدئية أكبر من ١٢ كيلومترًا في الثانية، وهي السرعة المعروفة باسم «سرعة الإفلات». فقط فوق هذه السرعة يكون مجموع طاقة الحركة وطاقة الوضع موجبًا ومن ثم يستطيع الجسم الإفلات من جاذبية الأرض، مع أنه سيظل حبيسًا داخل المجموعة الشمسية بطاقة إجمالية سالبة.

تعم قوة الجاذبية الكون بأسره وتغمر كل ما هو حبيس داخلها بطاقة الوضع السالبة. ومن الممكن حتى بعد إضافة كتلة المادة مضروبة في مربع سرعة الضوء أن تظل الطاقة الإجمالية للكون مقاربة للصفر. ومن ثم، وفق نظرية الكم، يمكن أن يكون

الكون مجرد تموج فراغي كبير تقارب طاقته الإجمالية الصفر بحيث يمكنه الاستمرار لفترة طويلة للغاية قبل أن يتحتم عليه العودة لحالة التوازن. وإذا كانت الطاقة الإجمالية صفرًا، يمكن للكون الاستمرار إلى الأبد.

إذا كان الحال كذلك، من يسعه الجزم بأن كوننا هو الكون الوحيد؟ لم نستبعد احتمالية وجود فقاعات أخرى من الأكوان المتعددة النشطة؟ يفكر العديد من المنظرين بجدية في مثل هذه الاحتمالية ويتجادل كثيرون منهم حول ما إذا كانت هذه الفكرة تقع داخل حدود العلم من حيث قابليتها للاختبار التجريبي.

مع تمدد الكون، يتمدد الفضاء لكن تحافظ الأجسام على ترابطها بفعل القوى الكهرومغناطيسية، على غرار الكواكب والنجوم، بيد أن حجمها لا يتغير، فقط المسافة بينها تتزايد. لا وجود لما يحوي الإشعاع الكهرومغناطيسي، ومن ثم يتمدد طوله الموجي مع اتساع الكون. من واقع نظرية الكم نعرف أن الطول الموجي يتناسب عكسيًّا مع الطاقة، ومن ثم فإن إشعاع الخلفية الكوني، الذي تبلغ حرارته اليوم ٣ درجات فقط فوق الصفر المطلق، كان فيما مضى أشد حرارة. الأمر عينه ينطبق على المادة. فمع تمدد الكون، فإن المادة الحبيسة داخل مجال الجاذبية الشامل ستتعاظم طاقة الوضع لديها على حساب طاقة الحركة. هذا التباطؤ الكوني يُدرك على صورة انخفاض في درجة الحرارة. وهكذا من واقع نسبة التمدد المرصودة للكون وما نعرفه عن إشعاع الخلفية الكوني اليوم يمكننا العودة بالحسابات بالزمن إلى الوراء وتقدير الحرارة التي كان عليها الكون في كل حقبة من حقب الماضي. وستزداد الحرارة أكثر وأكثر مع اقترابنا من الحد المتفرد الذي نسميه الانفجار العظيم.

كانت تصادمات الجسيمات أشد عنفًا وقتها، حتى إنه في درجة حرارة أعلى من ٤ آلاف درجة مئوية لم تكن الذرات ستتمكن من البقاء، بل كانت ستتأين مثلما يحدث داخل الشمس اليوم. وفي درجة حرارة تربو على المليار درجة حتى نويات الذرات كانت ستتفسخ، ولم يوجد في اللحظات الأولى من عمر الكون سوى بلازما من الجسيمات والإشعاع. قبل ذلك كانت الطاقة تكفي لظهور جسيمات المادة والمادة المضادة. تشير كل الدلائل إلى أن كوننا المادي جاء من فراغ من الإشعاع الحار.

تبين التجارب التي تتم في معجلات الجسيمات، مثل سيرن، كيفية سلوك جسيمات المادة والقوى في الطاقات العالية، وبالتبعية تحت الدرجات المتطرفة. يمكننا هذا من حساب ما كان عليه الكون رجوعًا إلى الوراء حتى حرارة قدرها $١٠^{٢٧}$ درجات، بعد

انقضاء $١٠^{-٣٣}$ ثوانٍ على الانفجار العظيم. كما رأينا من قبل، في درجات حرارة متفاوتة يمر الفراغ بتحولات طورية، بعضها أثبت تجريبيًّا والبعض الآخر نظريًّا. حين برد الكون لما دون $١٠^{١٥}$ درجات بعد نحو $١٠^{-١٠}$ ثوانٍ، انفصلت القوى الكهرومغناطيسية عن القوة النووية الضعيفة، وقد أثبت هذا من خلال إعادة تخليق هذه الطاقات تجريبيًّا. تتنبأ النظرية بأنه في درجة حرارة أعلى بقليل، حين كان عمر الكون $١٠^{-١٢}$ ثوانٍ، مر الفراغ الذي يفقد حرارته بتحول طوري تجمد فيه مجال هيجز واكتسبت فيه الجسيمات كتلها.

هكذا أصبحت لدينا صورة للكون وهو يتفجر كتموج كمي في الفراغ، وقد كان بصورة ما حارًّا للغاية وتمدد بسرعة عظيمة. كان من شأن هذه الصورة أن تؤدي إلى إنتاج كميات ضخمة من المادة والمادة المضادة على نحو متناظر، بيد أنه ما من دليل على بقاء المادة المضادة على صورة مكثفة اليوم. من المعتقد أنه لا بد من وجود نوع من التناظر بين البروتونات والبروتونات المضادة. لا يزال البحث جاريًا عن أصل هذا الأمر، بيد أنه قد يكون مثالًا آخر على انكسار التناظر التلقائي مع مرور الكون بتغير طوري.

التضخم

ثمة مشكلات بشأن هذا السيناريو، من بينها السؤال: من أين أتت كل هذه الطاقة الحرارية؟ علاوة على ذلك، نحن نعرف من واقع خبرتنا بالتغيرات الطورية في فيزياء المواد المكثفة أن هذه التغيرات لا تكون تامة السلاسة مطلقًا. على سبيل المثال، حين يبرد المعدن ليكون المغناطيس، تتفاوت شدة المغناطيسية من منطقة لأخرى، مشكلة ما يسمى «نطاقات» منفصلة من المغناطيسية. هناك مواطن خلل وعدم اتساق في كل أجزاء المعدن. من المفترض أن يكون الأمر قد جرى على هذا النحو في الكون حين مر بعملية التحول الطوري، متسببًا في وجود ظواهر مثل جدران الطاقة أو الأوتار الكونية، سمها ما شئت. لكن في كل حدث، لم يكن هناك أي مشاهدة واضحة لأي من هذه الظواهر العجيبة. أيضًا، تقترح هذه النظرية أنه من شأن تتابع الأحداث هذا أن يجعل تطور الكون سريعًا للغاية بحيث لا يتجاوز عمره أكثر من بضع عشرات الألوف من الأعوام وليس مليارات الأعوام. يمكن حل هذه التناقضات من خلال فكرة آلان جوث وبول شتاينهارت اللذين اقترحا أن كوننا ما هو إلا نطاق موجود داخل كون جامع أكبر. وفق هذه النظرية، والمعروفة باسم نظرية التضخم، فإن كوننا جاء نتيجة تضخم هائل

لواحد من هذه «النطاقات» الميكروسكوبية. للوهلة الأولى يبدو هذا مستحيلًا لأنه يتطلب أن تتطاير المادة في جميع الأرجاء على نحو تلقائي، وهو ما لن يحدث في ظل وجود قوة جذب كونية. ومع ذلك، في نظرية النسبية العامة، لا يسهم تكافؤ المادة والطاقة والزخم وحدهما في الأمر، بل الضغط أيضًا، وإذا كان الضغط سالبًا وهيمن على المادة والطاقات الحرارية، يمكن أن تكون النتيجة تمددًا سريعًا، أشبه بتأثير «مضاد للجاذبية».

ما لاحظه آلان جوث هو أنه لو احتوى الفراغ الحقيقي على مجال هيجز، فهناك إمكانية لأن تكون منطقة ما من الكون في حالة فراغ غير مستقر أو «زائف». (الفراغ الزائف أشبه بالحالة التي يكون فيها القلم واقفًا على سنه، والفراغ الحقيقي هو حين يسقط القلم على المائدة). كما تذكر فإن إضافة مجال هيجز إلى الفراغ الزائف من شأنه أن «يخفض» الطاقة. في الفراغ الزائف تتناسب الطاقة الإجمالية مع الحجم، وثمة حاجة للعمل من أجل زيادة ذلك الحجم. وبسبب حالة الطاقة المنخفضة في فراغ هيجز، تكون النزعة الطبيعية لمثل هذا الفراغ هي أن ينكمش، وفي حالة فراغ هيجز الحقيقي ستكون حالة الفراغ الزائف هي الحالة التي يكون فيها الضغط سالبًا. وبهذا إذا حدث التذبذب في منطقة من الفراغ الزائف، يستطيع التأثير الجذبوي للضغط السالب أن يتغلب على ذلك الخاص بالمادة، وهو ما يؤدي إلى التمدد. وبينما يتحول الكون من الفراغ الزائف إلى فراغ هيجز في هذه الصورة، من الممكن أن يحدث تضخم هائل في فترة قصيرة للغاية.

ثمة أمثلة في فيزياء المواد المكثفة على الأنظمة فائقة التبريد. ويحدث هذا حين يظل النظام في الطور «الخطأ» كما يحدث حين يظل الماء سائلًا تحت نقطة التجمد الاسمية. ربما حدث أمر مشابه للفراغ الكوني. يحدث تذبذب في الفراغ الزائف ويستمر، ثم لاحقًا يتحول الكون إلى الفراغ الحقيقي. وقد بينت الحسابات أنه في مثل هذه الظروف يمكن لأي منطقة من الكون أن يتضاعف حجمها كل $١٠^{-٣٤}$ ثوانٍ!

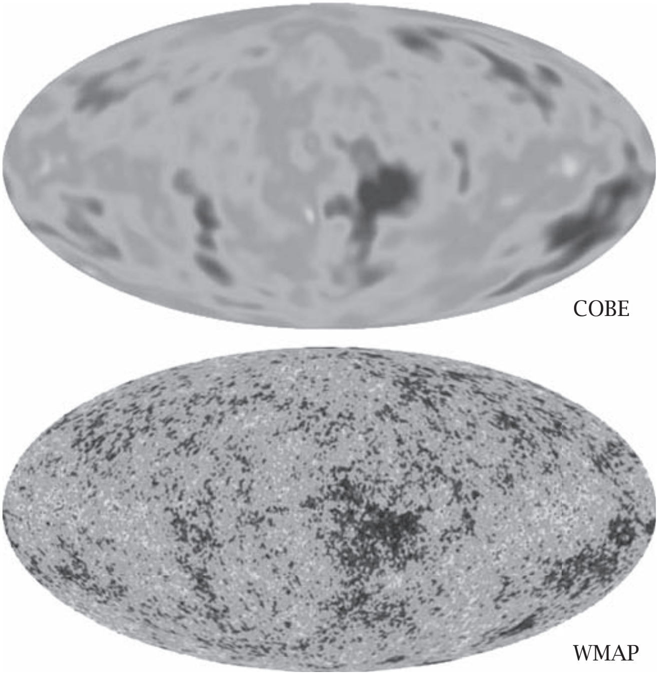
بعد حقبة التضخم، يطلق التحول إلى الفراغ الحقيقي طاقة، على غرار انبعاث الطاقة الكامنة حين يتجمد الماء. أنتجت هذه الطاقة جسيمات المادة التي شكلت في نهاية المطاف المجرات والنجوم والبشر. لقوى الجذب طاقة وضع سالبة تعادل هذه الطاقة، وهو ما يجعل الطاقة الإجمالية مقاربة للصفر.

إن تأثير هذا التضخم مفاجئ بحق. تبلغ مساحة كوننا القابل للرصد نحو $١٠^{٢٦}$ أمتار عرضًا. وبالعودة بالزمن إلى الوراء، حين كانت درجة حرارة الكون $١٠^{٢٨}$ درجات، وذلك حين انتهى التضخم، كان من شأن كوننا المستقبلي أن يكون حجمه مجرد بضعة

سنتيمترات. كان من شأن حقبة التضخم أن تسبب تمدد الكون بنسبة $١٠^{٥٠}$، وهو ما يعني أن كرة التضخم المبدئية بلغت من الحجم $١٠^{-٥٢}$ أمتار فقط، وهو ما يتوافق على نحو طيب مع حجم التذبذبات التي يمكن للمرء توقعها في الجاذبية الكمية.

إبان التضخم كان هناك تمدد جامح وقع بصورة أسرع من ذلك. بلغ التمدد من السرعة ما جعل بعض الأجسام التي كانت قريبة بعضها من بعض بما يمكنها من تبادل المعلومات، على غرار الإشعاع، تُقذف بعيدًا إلى أجزاء منفصلة من الكون بحيث صارت بعيدة إلى درجة تمنعها من تبادل المعلومات الآن. على سبيل المثال، هناك مجرات تبعد عنا بنحو ١٠ مليارات سنة ضوئية في مناطق متقابلة من السماء، وهو ما يعني أنها بعيدة بعضها عن بعض بما يفوق ١٤ مليار سنة ضوئية، وهي مسافة أكبر من تلك التي يستطيع الضوء أن يقطعها خلال عمر الكون. ومع ذلك تطيع تلك المجرات قوانين الفيزياء عينها، وأطياف عناصرها — الأشبه برسائل الفاكس الآتية من بعيد وتكشف عن العناصر وعن خصائصها — تبدو واحدة في شتى أرجاء الكون القابل للرصد. وإشعاع الخلفية الكوني له نفس الحرارة والشدة في كل أرجاء الكون بدرجة تطابق قدرها جزء واحد في العشرة آلاف جزء. ومن السذاجة الاعتقاد بأن كل هذا الاتساق جاء وليد الصدفة. لا بد أن كوننا القابل للرصد بأكمله كان مرتبطًا على نحو سببي في نقطة ما من الماضي، وفي غياب التضخم سيكون ذلك أمرًا متناقضًا.

هناك الكثير من الجهود الرياضية المبذولة حاليًّا بشأن الكيفية التي يمكن أن تتصرف بها المجالات في نظرية الكم. أحد الاستنتاجات التي جرى التوصل إليها تقضي بأنه من المستحيل تقريبًا تجنب التضخم، وهو أمر طيب يعين على تفسير الكون، لكنه يجعل عملية تحديد الآلية الفعلية أمرًا صعبًا. كل ما يسعنا فعله حاليًّا هو العمل انطلاقًا مما نراه اليوم في الكون، عائدين بالزمن إلى الوراء، وأن نجري حساباتنا كي نصل إلى الشكل الذي كان عليه التضخم، ثم نرى هل يمكننا اختبار النتائج. تعمل التذبذبات الصغيرة في بنية الزمكان في حقبة الجاذبية الكمية كمصدر جذب لتجميع المادة، التي نمت في نهاية المطاف لتصير بذور المجرات. وإذا أجرينا محاكاة حاسوبية لسلوك الكون، مع الوضع في الاعتبار بنيته وجاذبيته الحاليتين، ثم عدنا بالزمن إلى الوراء فسنجد أن شدة تذبذبات الفراغ لا بد أنها بلغت نسبة تقارب الجزء من كل ١٠ آلاف جزء. النتيجة المثيرة للاهتمام هي أن هذه الآثار كانت حاضرة في إشعاع الخلفية الكوني قبل تكون المجرات. في السنوات القليلة الأخيرة تأكد هذا على نحو حاسم من خلال



شكل ٩-١: تفاوتات في إشعاع الخلفية الميكروني الكوني كما رصدها القمران الصناعيان COBE وWMAP.[1]

قياسات الإشعاع المأخوذة بواسطة الأقمار الصناعية: القمر الصناعي COBE (مستكشف الخلفية الكونية) والقمر الصناعي WMAP (مسبار ويلكينسون لقياس اختلاف الموجات الراديوية). تظهر القياسات تفاوتات على مستوى بضعة أجزاء لكل عشرة آلاف جزء في درجة الحرارة. وتحديدًا، يقيس هذان المسباران هذه التذبذبات على مستويات دقة متعددة، أو زوايا صغيرة أو امتدادات أكبر، ثم تجد السلوك الكسري، وكلما زادت دقة الرصد تظهر تفاصيل أكثر على نحو متكرر. يبدو أن هذه الظواهر تتماشى مع المتوقع إذا كانت متخلفة فعلًا عن التضخم. ولا عجب أن مُنحت جائزة نوبل في الفيزياء في عام ٢٠٠٦ للقائمين على هذا البحث.

إذن، تتفق أفضل بياناتنا مع النظرية القائلة إن كوننا الفسيح تمدد على نحو مفاجئ بفعل التضخم. ولو صح هذا، قد يكون لدينا إجابة عن السؤال «من أين أتينا؟» فكل شيء يتوافق مع صورتنا الحالية عن الكون المبنية على الرصد والعلم التجريبي. ومع أن هذه الصورة تقدم إجابات لسؤالي الأساسي، فإن هذا يتحقق على حساب إثارة المزيد من الأسئلة التي يمكن أن تكون أكثر عمقًا. لقد حل التضخم بعد الحقبة التي هيمنت فيها قوة الجاذبية. لقد ألمحنا إلى السمات الغريبة التي اتسم بها الزمكان والمتمثلة في وجود التذبذبات في نسيجه، ورأينا حتى إن إشعاع الخلفية الكوني يظهر ما يبدو وكأنه آثار حفرية لمثل هذه التذبذبات. ولا يوجد سبب وحيد يدعونا للاعتقاد بأن كوننا المتضخم كان، أو لا يزال، حدثًا فريدًا لم يتكرر. فمن الممكن أن تكون أكوان مماثلة عديدة قد ظهرت على نحو مشابه لكوننا، لكنها خارج نطاق إدراكنا. وفي مواجهة النطاق المذهل من المصادفات في طبيعة القوى، وكتل الجسيمات الأساسية، بل حتى وجود ثلاثة أبعاد للمكان، التي لولاها لما أمكن للظروف المواتية للحياة أن تتوافر، يجد المرء نفسه مجبرًا على التساؤل عن سبب ملاءمة الكون على هذا النحو للبشر. من الأفكار الشائعة بين العلماء فكرة وجود أكوان متعددة، قد يكون عددها لانهائيًّا، لها معاملاتها وأبعادها الخاصة، وأن أحد هذه الأكوان تصادف أنه ملائم لاستضافة الحياة، وأننا تطورنا بهذا الكون. مرحبًا بك إذن إلى مفهوم الكون المتعدد، مع أنني أتشكك في إمكانية إخضاع مثل هذه الفرضية للاختبار العلمي.

أبعاد أعلى

في فلسفة الكون الكمي، ما نسميه المكان والزمان ظهرا من فقاعة كمية. لا يوجد شيء في العلم المعروف يعارض هذه الفلسفة وهي تتوافق مع أغلب ما يحدث في كوننا القابل للرصد، لكن من ناحية أخرى لا يوجد توصيف رياضي متفق عليه لها من شأنه أن يؤدي على نحو حتمي للكون الذي ندركه، ولا يوجد أي اختبارات تجريبية حاسمة. لهذا هي تعد في الوقت الحاضر مسألة إيمان بالأساس، لكن مع تطور الأساليب التجريبية ربما يدخل المزيد منها تحت مظلة العلم التجريبي. لنكمل حديثنا ونحن نضع هذا التحذير في اعتبارنا.

تقضي نظريتنا الشائعة بوجود عدد من الأبعاد في الكون أكبر من ذلك الذي ندركه حاليًّا. بعض هذه الأبعاد، باللغة الاصطلاحية، «انطوت» إلى أحجام صغيرة للغاية حتى

إنها صارت خارج نطاق خبرتنا، فيما تمدد البعض الآخر نتيجة الانفجار العظيم ليكون الأبعاد المرئية كبيرة الحجم المألوفة الموجودة في كوننا ذي الزمكان رباعي الأبعاد. وهذا يستتبع السؤال عن الماهية الفعلية للأبعاد، وهل توجد في غياب «المادة»، وعن الأمر المميز بخصوص الأبعاد المكانية الثلاث، وإذا كانت هناك أبعاد إضافية، فكيف يمكننا الكشف عنها بطريقة علمية؟

إذا كنت لا تعي سوى بعد واحد، لنقل مثلًا خط زوال جرينيتش الممتد من الشمال إلى الجنوب، فإن أي شخص يتحرك في اتجاه الشرق سيختفي تمامًا من عالمك الخطي. وإذا كنا ندرك فقط الأسطح المستوية، فإن طائرة مقلعة ستختفي حرفيًّا عن ناظرينا. وإذا كان هناك وجود لبعد رابع، وكان بمقدور كائنٍ ما خارقِ التحركُ داخله، فسيظهر داخل عالمنا ويختفي فورًا كالشبح وذلك حين يتقاطع مساره رباعي الأبعاد مع عالمنا ثلاثي الأبعاد. هذا يصل بنا إلى حدود عالمنا الواقعي. قد يبدو الدخول في بعد رابع والاختفاء أشبه بالخيال العلمي، لكن بمقدورنا تصوره: كما هو الحال مثلًا مع بعد الزمن، وفكرة الخيال العلمي المحبوبة من الكثيرين المتعلقة بالسفر عبر الزمن.

كيف يعد الزمن بُعدًا؟ بالتأكيد للزمن نطاق متمثل في تواريخ السجلات التاريخية، التي تبدو وكأنها نقاط ممتدة في اتجاه ما. وإذا تمكن أحدهم في مكاننا ثلاثي الأبعاد من تصنيع آلة للزمن بحيث يستطيع التحرك إلى نقطة مختلفة في الاتجاه الزمني، سواء للأمام أو الخلف، فلن يبدو بُعد الزمن مختلفًا عن أي من أبعاد المكان. وإذا امتلكنا مثل هذه الآلة فسنتحرك على امتداد هذا البعد الرابع معه، لكن دون الآلة سنظل عالقين في الزمن الحاضر، وحين ينتقل المسافر عبر الزمن إلى «الأمس»، فسيختفي من أمام أعيننا. وعلى العكس، لو كنا في المكان المناسب في مكان الأمس ثلاثي الأبعاد، فقد نشهد ظهورًا مفاجئًا لهذا الشخص من العدم.

إذن، يتسم الزمن دون شك بسمات البُعد، بيد أنه بُعد مختلف من الناحية النوعية عن الأبعاد المكانية. فنحن موجودون في نقطة ما من الزمن هو «اللحظة الآنية»، وهذه اللحظة لحظة مختلفة عن اللحظة السابقة نستطيع فيها أن نتذكر ما حدث في اللحظة السابقة، واللحظات التي لم تأتِ بعد، لم تأت بعد. إنه بُعد ذو حدود، وبمقدورنا النظر عبر الزمن بالنظر إلى الفضاء؛ إذ إن الضوء يستغرق بعض الوقت حتى ينتقل من النجوم البعيدة إلينا.

حين ننظر إلى القمر فإننا نراه كما كان عليه منذ لحظة واحدة، أما الشمس فنراها كما كانت عليه منذ ثماني دقائق، والضوء الآتي من النجوم في سماء الليل سافر عبر

الفضاء الوسيط لآلاف السنوات أو أكثر، وهكذا فنحن نراها على ما كانت عليه في الماضي. إذا نظر كائن ما على أحد الكواكب التي تدور حول إحدى هذه النجوم البعيدة في سماء ليله وأنت تقرأ هذه الكلمات، فسيرى شمسنا كما كانت عليه منذ آلاف السنوات، ربما حتى قبل أن يظهر البشر على الأرض. وهكذا يصير مفهوم «الآن» أقل وضوحًا.

يمكننا النظر في أعماق الفضاء عائدين بالزمن إلى الوراء، وصولًا إلى النقطة التي نسميها الانفجار العظيم. وإذا ولد كوننا ذو المكان والزمان حينها، فبُعد الزمن له نطاق ممتد لما لا يقل عن ١٤ مليار عام إلى الآن. ويمكننا السفر إلى المستقبل والنظر منه إلى الماضي، وبهذا يملك الزمن سمة البُعد الذي نستطيع التحرك خلاله، بيد أنه مختلف عن أبعاد المكان الثلاثة. فإذا لم يعجبنا المكان الذي وصلنا إليه، نستطيع العودة مجددًا من حيث أتينا، لكن في حالة بُعد الزمن يستحيل علينا هذا.

منذ أن لاحظ إدوين هابل أن المجرات يبتعد بعضها عن بعض صار لدينا صورة للكون المتمدد، الأثر الممتد طوال ١٤ مليار عام للحدث الذي نسميه الانفجار العظيم. وأمور مثل: ما سبب الانفجار العظيم؟ ومن أين أتى؟ تعد نسخة حديثة من أساطير الخلق. لكننا نملك ميزة عند محاولة تفسير هذه الأمور، وهي معرفتنا بميكانيكا الكم، التي تمنحنا أفكارًا جديدة، ليس فقط عن الفراغ بوصفه وسطًا، بل أيضًا عن الطبيعة غير اليقينية للمكان والزمان. وأفضل ما يسعنا فعله هو تصور تلك الحقبة من منظور خبراتنا. وهذه الخبرات تخبرنا بأنه حين تتجمع المادة على نحو لصيق فإنها تستشعر قوة الجاذبية، وهو الأمر الخاضع للنسبية العامة وقوانين ميكانيكا الكم.

كما رأينا من قبل، بينما تصف النسبية العامة الكون على المستوى الضخم، تقدم ميكانيكا الكم تفسيرات دقيقة عن الظواهر الواقعة على مستويات الحجم دون الذرية، بيد أن الوصول لنظرية متسقة رياضيًّا ومختبرة تجريبيًّا تجمع بين هاتين الدعامتين العظيمتين لعلوم القرن العشرين لم يتحقق بعد. ولفهم ما كان عليه حال الكون خلال اللحظات الأولى من الانفجار العظيم سنحتاج إلى نظرية كمية للجاذبية. في النسبية العامة يرتبط انحناء الزمكان بتركيز الطاقة. ومن شأن عدم اليقين أو التشوه الذي يصيب الطاقة في الكون الكمي أن يؤدي إلى عدم يقين مماثل في انحناء الزمكان، وهو ما يؤدي إلى حدوث تذبذبات في المسافات، أو على وجه التحديد في نسيج الزمكان (الفصل السادس). ستتسم هندسة الكون كلها بعدم اليقين، وستعجز خبراتنا عن استيعاب فكرة الأبعاد وأعدادها.

يبدو أن أفضل النظريات الواعدة حاليًّا، التي تعمد لحل هذه المشكلات، تعمل على النحو الأفضل إذا كان للكون أبعاد عديدة، ربما عشرة أبعاد، وهذه النظريات تعرف باسم نظريات الأوتار. وليس من المؤكد بعد هل هذا التبسيط للعمليات الفيزيائية في الطاقات العالية في أبعاد عديدة مجرد حيلة رياضية تمكننا من إجراء حسابات معقولة أم أنه يلمح لشيء آخر أعمق بشأن نسيج الكون. على أي حال، لربط هذا الكون ذي الأبعاد الأعلى بالكون الذي ندركه، علينا الجزم بأن كل الأبعاد المكانية، خلا ثلاثة منها، صغيرة على نحو دقيق للغاية. ومع أن كل هذه الأبعاد كانت مهمة على نحو متناظر في حقبة الجاذبية الكمية، وحدهما المكان والزمان كما نعرفهما هما اللذان تضخما ليضما الكون المرئي الذي نعيه اليوم.

قد يخبرنا العلم قريبًا بإجابة السؤال: هل توجد أبعاد أخرى غير أبعاد المكان وبعد الزمان؟ فبالإضافة إلى الأبعاد الممتدة من الأعلى للأسفل، ومن الخلف للأمام، ومن الجانب للجانب، يمكن أن تكون هناك أبعاد أخرى «بالداخل». وحتى وقت قريب للغاية كان من المعتقد أن هذه الأبعاد الأعلى فُقدت للأبد في الزبد الكمي، لكن تشير الأفكار المبتكرة التي تحاول تفسير سبب ضعف قوة الجاذبية الشديد على المستوى الذري قياسًا بالقوى الأخرى إلى أن الجاذبية ربما تتسرب إلى أبعاد أعلى يمكن لها حتى أن توجد على مستويات يمكن الوصول إليها من خلال التجارب التي تتم في مصادم الهادرونات الكبير بمختبر سيرن. تحدثنا من قبل عن الطائرة التي تقلع إلى البعد الثالث ومن ثم تختفي من نظر أي قاطن لسطح ثنائي الأبعاد، وبالمثل، يمكن للجسيمات التي تظهر آتية من البعد الخامس، أو مختفية فيه، في مصادم الهادرونات الكبير أن تكون علامة على أن الزمكان في حقيقته أشبه بالجبن السويسري؛ من حيث إنه مليء بالفقاعات الدقيقة التي تقع على حدود قدرتنا الحالية على القياس.

بحثًا عن الفراغ

قد تكون فكرة الأبعاد الأعلى حقيقة واقعة، أو قد تكون مجرد خيال علمي، بيد أنها على أي حال وسيلة قوية لمساعدتنا في التدريبات العقلية المطلوبة لمحاولة حل التناقضات المرتبطة بقضية أين كان الكون في اليوم السابق على مولده.

ترتبط مشكلتنا بنظرتنا إلى الزمن بوصفه بعدًا خطيًّا أحاديًّا. فإذا سُرد تاريخ الكون على خط رأسي، بحيث يحتل «الحاضر» نقطة معينة عليه، فسيكون المستقبل

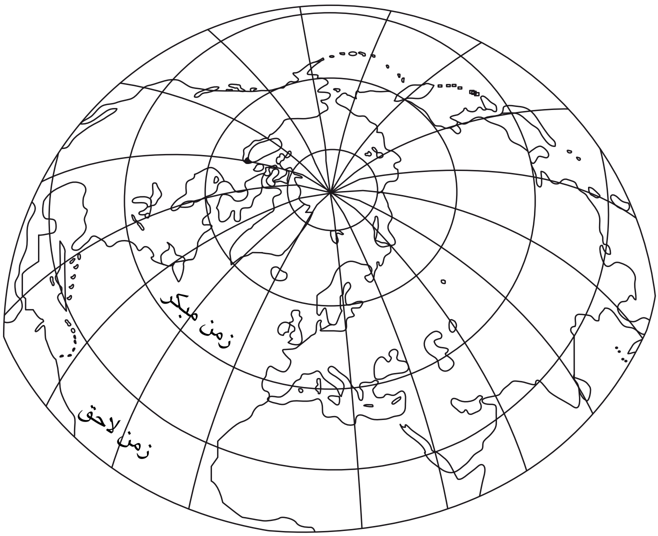
بالأعلى والماضي بالأسفل، ويكون الانفجار العظيم في القاعدة. لكن هناك يتوقف الخط، ولا يوجد أدناه شيء. في هذا التمثيل الزمني الخطي، لم يكن هناك زمن قبل الزمن. وفي هذه النقطة يلوح مفهوم العدم، حيث يملأ الشِّعر فراغ عجزنا عن الفهم النابع من خيالنا المحدود. وفق راوية سفر التكوين، في البدء كان «على وجه الغَمْرِ ظلمة»، وفي الريجفدا كان المجهول أعمق وأعمق: «كان الظلام يحجبه ظلام.»

تعرضنا لفكرة قاطن الأرض المسطحة، الذي لا يعي بوجود أي بعد يعلو مستواه المسطح. ربما كنا مثله، غير واعين لوجود أبعاد أخرى خارج نطاقنا المألوف.

رأينا بالفعل أينشتاين وصورته رباعية الأبعاد عن الزمكان، التي يرتبط فيها الانحناء بالجاذبية. أخذ هوكينج وهارتل خطوة إضافية وتصورا الكون بوصفه سطحًا رباعي الأبعاد لكرة خماسية الأبعاد. أعجز عن تصور هذا، وإحقاقًا للحق حتى واضعو النظرية يعجزون عن تصور هذا إلا رياضيًّا. ومع ذلك، يمكننا تصور نسخة أبسط، لاعبين مجددًا دور الكائنات التي تعي فقط أبعادًا مكانية محدودة وتدرك أن كونها يتمدد مع مرور الزمن. يقترح هذا أن كوننا يبدو أنه يتمدد فقط وذلك نتيجة لإدراكنا المحدود. لكن في نموذج هوكينج-هارتل لا يوجد تمدد، أو بداية؛ فالكون موجود وحسب.

بدلًا من الثلاثة أبعاد المكانية إضافة إلى بعد الزمن، تخيل أن الكون به بعد مكاني واحد إضافة لبعد الزمن، وأنه يتجه من نقطة وحيدة (الانفجار العظيم) إلى نقطة نهاية (الانسحاق العظيم). اقترح هوكينج وهارتل أن الزمن قد لا يكون تدفقًا خطيًّا ثابتًا، بل أن يكون له بعد آخر، الذي يمكننا تسميته «الزمن المتخيل». افترض أننا نمثل الكون ذا البعد المكاني الواحد والبعد الزماني الواحد، إضافة إلى الزمن المتخيل، على سطح كرة. يمكننا تحديد النقاط على هذه الكرة بواسطة خطوط الطول ودوائر العرض، كما الحال على سطح الأرض. في صورة هوكينج وهارتل تكون دوائر العرض هي الإحداثيات الزمنية، وخطوط الطول هي ما يطلقون عليه «الزمن المتخيل». في هذه الصورة يكون الانفجار العظيم عند القطب الشمالي والانسحاق العظيم عند القطب الجنوبي. تتوافق كل دائرة عرض مع زمن محدد، على سبيل المثال قد تمثل دائرة عرض ٤٠ درجة إلى الشمال «الوقت الحالي».

الآن، انظر إلى المنطقة الموجودة قرب القطب الشمالي. كلما اقتربنا من زمن الصفر صارت شبكة الزمن المتخيل مكدسة بالخطوط، مثلما يتسبب الاقتراب من القطب الشمالي في تلاقي كل خطوط الطول. ما من شيء متفرد بشأن القطب، فحقيقة أن جميع الخطوط



شكل ٩-٢: تاريخ الكون في المكان والزمن المتخيل.

تتلاقى هناك ليست سوى «مصادفة» نبعت من اختيارنا للكيفية التي اخترنا أن نرسم الشبكة بها. على كوكب الأرض لا يختلف السفر حول القطب الشمالي عن السفر لأي مكان آخر على سطح الكرة الأرضية، باستثناء الطقس البارد. كان بمقدورنا أن نخطط الكوكب بخطوط نابعة من لندن وتتلاقى على الجانب المقابل للكوكب لو رغبنا في ذلك.

من الممكن أن يكون زمن هوكينج وهارتل المتخيل مجرد تصور خيالي، أو ربما هي نظرية متسقة رياضيًّا تفوق خيالنا وحسب. هذا مثال معاصر على المعضلة التي ابتلي بها المفكرون على مدار ألفيات ثلاث: أن عقولنا طورت نظرة للعالم مبنية على إحساسنا الملموس بالزمن والأبعاد المكانية الثلاث. فنحن نصف المادة والطاقة داخل هذا الإطار العقلي. وتنشا التناقضات بخصوص «بداية» الكون حين نحصر أنفسنا في هذه الصورة العقلية. ومع ذلك، فمنذ ١٤ مليار عام كان المكان والزمان من الانحناء والتذبذب بحيث كانت «الحقيقة» بعيدة للغاية عن قدرتنا التصورية. لقد أنتج الانفجار العظيم المكان

والزمان. أما قبله (وكلمة «قبل» هنا بالطبع ليس لها معنى إلا في سياق إطارنا العقلي المألوف) فلم يكن هناك أمس.

من الممكن أن نتصور أن ما نطلق عليه الانفجار العظيم حدث حين ظهر الكون المضغوط من حقبة الجاذبية الكمية، وذلك حين حل الزمن العادي محل الزمن المتخيل. أما الأسئلة على غرار «من أين أتى كل شيء؟» و«كيف بدأ الأمر كله؟» فلا محل لها؛ فالكون وفق هذه الصورة لم يكن له بداية، وليس له نهاية، فهو وجود وحسب. هل تشعر أن هذه هي إجابة سؤال العصور، وأن مفارقة الوجود قد حُلت؟ أنا عن نفسي لست مقتنعًا، فالزمن المتخيل، على الأقل من وجهة نظري، لا يمكن تخيله. ربما تمكنا من تحديد المشكلة العظمى، بيد أن هذا لا يعني أننا تمكنا من فهم الإجابة. إذ يظل سبب وجود الكون، وأين يوجد، لغزين معضلين.

لو أن الأكوان المتعددة نشأت نتيجة التذبذبات الكمية، وتصادف أن كانت فقاعتنا محظوظة بحيث كانت القوانين والأبعاد والقوى بها ملائمة تمامًا لتطور الحياة والبشر، فهذا لا يزال يستدعي التساؤل عن من أو ماذا حدد القواعد الكمية التي مكنت كل هذا من الحدوث وأين. هل كان أناكساجوراس محقًّا: وأن الكون ظهر كتنظيم وسط الفوضى، وأن المادة الأصلية هي الفراغ الكمي؟ أو ربما يكون تصور هوكينج وهارتل، عن الكون عديم البداية أو النهاية والموجود وحسب، هو الإجابة، بحيث يكون رأي طاليس، الذي أصر على أن الشيء لا يمكن أن يظهر من العدم، هو الصحيح؟ وبهذا تكون مفارقة الوجود لغزًا لم يحل بعد بشأن طبيعة المكان والزمان.

خلال الثلاثة آلاف عام التي انقضت منذ أن بدأ فلاسفة الإغريق يتساءلون بشأن لغز الوجود؛ نعني بهذا ظهور شيء من لا شيء، كشف المنهج العلمي عن حقائق لم يكن بمقدورهم تخيلها. فالفراغ الكمي، العميق بلا نهاية والمليء بالجسيمات، والقادر على اتخاذ أشكال مختلفة، وإمكانية حدوث التذبذبات الكمية كلها أمور تقع خارج نطاق فلسفتهم. لم يكن هؤلاء الفلاسفة يدركون أن الطاقة الموجبة الموجودة داخل المادة يمكن أن تعادلها الطاقة السالبة الموجودة في مجال الجاذبية المتغلغل في كل مكان، بحيث تصير الطاقة الإجمالية للكون مقاربة للصفر، وأنه حين يقترن هذا بعدم اليقين الكمي فقد يسمح بإمكانية أن كل شيء في الواقع مرده إلى تذبذب كمي طفيف حدث لوقت يسير. وبهذا يمكن أن يكون كل شيء مجرد تذبذب كمي نابع من لا شيء.

لكن لو كان الحال كذلك، يظل هناك لغز مصدر وجود الإمكانية الكمية في الفراغ. في سفر التكوين قال الرب: «ليكن نور»، لكن في الريجفدا ما الآلهة سوى نتاج الخيال

البشري، استحضرها البشر لتفسير ما يوجد خلف نطاق فهمهم: «جاءت الآلهة فيما بعد ... فمن إذن يعلم من أين جاء كل شيء؟» وبينما يكتشف العلم الإجابات، فهو يكشف عن أسئلة أعمق تاركًا إجابتها للمستقبل. وفي الوقت الحالي، سأترككم مع أسطر مأخوذة من الريجفدا:

لم يكن ثمة وجود، لا للموجود ولا لغير الموجود
كان ظلامًا يحجبه ظلام
وكان ما وُجد محاطًا بالعدم.

هوامش

(1) NASA/WMAP Science Team.

ملاحظات

الفصل الأول

هناك ترجمات عدة للريجفدا، وهو ما يكشف عنه البحث على محرك جوجل. هذه الأسطر تحديدًا مأخوذة من ترجمة إلى الإنجليزية بواسطة ويندي دونيجر أوفلاهرتي في كتاب «مقتطفات نهر الفيدا» (بينجوين، ١٩٨٢).

الفصل السابع

لمزيد من الصور عن تخليق الأزواج وغيرها من أمثلة التأثيرات الكمية المشابهة، انظر كتاب إف إي كلوس وإم مارتن وسي ساتون «أوديسا الجسيمات» (أكسفورد يونيفيرسيتي برس، ٢٠٠٢) وللحصول على توصيفات عن كيفية التقاط هذه الصور انظر أيضًا كتاب فرانك كلوس «فيزياء الجسيمات: مقدمة قصيرة جدًّا» (أكسفورد يونيفيرسيتي برس، ٢٠٠٤).

الفصل الثامن

حالات انعدام التناظر العجيبة العديدة بين اليمين واليسار موصوفة في كتاب كلوس «إرث لوسيفر» وكتاب سي ماكمانوس «اليد اليمنى، اليد اليسرى» (وايندنفيلد آند نيكلسون، ٢٠٠٢).

الفصل التاسع

هناك العديد من الكتب والمقالات عن «المبدأ الإنساني» وهو ما يكشف عنه البحث على محرك جوجل. من الكتب الحديثة التي تتناول أفكار الكون المتعدد كتاب بول ديفيز «الجائزة الكونية الكبرى» (ألين لين، ٢٠٠٦). [ترجمته شركة كلمات]

هذه النظريات عميقة من الناحية الرياضية ومثيرة للاهتمام. انظر كتاب بي جرين «الكون الأنيق» (جوناثان كيب، ١٩٩٩). ومع ذلك، ليس واضحًا ما إذا كانت بالأساس مغامرات في الرياضيات أم أنها نظرية كل شيء التي طال البحث عنها. للحصول على تقييم نقدي، انظر أيضًا كتاب بي فويت بعنوان «ليست خطأ فحسب» (جوناثان كيب، ٢٠٠٦).

قراءات إضافية

There is much about nothing that I have been unable to include here, and much more that has already been written. I have referred to some of these books and articles in the text, and collect them here together with some suggestions for further reading. This is by no means exhaustive. If you are seriously interested in nothing, the books by Barrow and Genz in particular contain an extensive list of references and original sources.

The Book of Nothing by John D. Barrow (Vintage, 2000) and *Nothingness* by Henning Genz (Perseus, 1999) go further and more deeply in some cases into the story of the vacuum and other manifestations of 'nothing'. Barrow discusses also the mathematical story of zero and aspects of cosmology, in particular of multiple universes, in detail. Genz has a particularly good description of the Higgs mechanism and of spontaneous symmetry breaking in condensed matter systems.

A Different Universe by Robert Laughlin (Basic Books, 2005) describes the emergent nature of the laws of macroscopic phenomena and of the nature of the vacuum.

Lucifer's Legacy by Frank Close (Oxford University Press, 2000) describes spontaneous symmetry breaking and many examples of symmetries

in Nature. *Particle Physics: A Very Short Introduction* (Oxford University Press, 2004) and *The New Cosmic Onion* (Taylor and Francis, 2007), both by Frank Close, give the ideas of particle physics that form some of the background to the later chapters of the present book. *Antimatter* by Frank Close (Oxford University Press) tells all about antimatter, in particular separating the factual reality from the fictional myths.

The Goldilocks Enigma by Paul Davies (Allen Lane, 2006) describes the ideas of multiple universes and how our particular universe is so finely tuned for life.

The Particle Odyssey by F. E. Close, M. Marten, and C. Sutton (Oxford University Press, 2002) is a highly illustrated history of modern physics.

Einstein's Mirror by A. Hey and P.Walters (Cambridge University Press, 1997) gives a popular introduction to relativity and *The New Quantum Universe* (Cambridge University Press, 2003) does the same for quantum theory.

'Nothing's Plenty: The Vacuum in Modern Quantum Field Theory' by I. J. R. Aitchison, in *Contemporary Physics*, 26 (1985), 333–391 gives a more advanced discussion of modern ideas about the quantum vacuum.